

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання і дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту ім. М.П. Момотенка
(назва кафедри)

_____ Роговський І. Л.
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА

на тему «Розробка конструкції газогенератора, що працює на пелетах з кукурудзиння»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Гарант освітньої програми

Д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Булгаков В.М.
(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

К.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Цивенкова Н.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Курдун С.В.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання і дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Технічного сервісу та інженерного менеджменту
ім. М. П. Момотенка

Д.Т.Н., професор Роговський І.Л.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту

Курдун Святославу В'ячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра «Розробка конструкції газогенератора, що працює на пелетах з кукурудзиння»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “12” грудня 2024 р. № 2265 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру 15.05.2025 р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до дипломного проєкту бакалавра: наукові дослідження про процес газифікації рослинної біомаси, таблиці з фізико-механічними властивостями біомаси, каталоги з кресленнями газогенераторів, а також їх вузлів та деталей, зразки розрахунків теплових балансів газогенераторів, зразки розрахунків економічних показників підприємств, які встановили і експлуатують газогенератори, технологічні схеми попередньої підготовки біомаси (пелетування, гранулювання) до виробництва генераторного газу.

Перелік питань, які потрібно розробити: виконати аналіз фізико-механічних властивостей біомаси з метою її газифікації; виконати аналіз технологій попередньої підготовки біомаси до газифікації (виробництво гранул); розробити технологічний процес виробництва генераторного газу з пелет на кукурудзинні; розробка конструкції газогенератора та його вузлів (окислювально-відновлювального конвертера, бункера, корпусу, системи подачі повітря тощо).

Перелік графічних документів (за потреби): 12–15 слайдів.

Дата видачі завдання “15” грудня 2024 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра

(підпис)

Цивенкова Н. М.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Курдун С.В.

(прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

В дипломному проєкті представлено конструкцію газогенератора, що працює на пелетах з кукурудзиння. Розглянуто технології газифікації рослинної біомаси та конструкції газогенераторів на біомасі. З поміж новітніх конструкцій газогенераторів вирішено проектувати газогенератор протипотоковий, оскільки саме така конструкція забезпечує виробництво генераторного газу з біомаси з високим вмістом CO та H₂. Представлено розрахунки та модернізовану конструкцію газогенератора, яка на 25 % є більш ефективною порівняно з аналогами за кількістю та якістю виробленого газу.

Мета робота – розробити конструкцію газогенератора, що працює на пелетах з кукурудзиння.

Перший розділ дипломного проєкту містить інформацію про види біомаси та її характеристики (паливні, механічні, хіміко-фізичні), які визначають її придатність до термічної переробки шляхом газифікації. Також представлено технологічний процес виробництва гранул з кукурудзиння з метою збільшення їх насипної щільності та покращення паливних характеристик.

В другому розділі проаналізовано основи процесу газифікації рослинної біомаси та представлено технологічний процес виробництва генераторного газу з пелет з кукурудзиння.

В третьому розділі: наведено креслення удосконаленої конструкції газогенератора, що працює на кукурудзинні; представлено креслення окислювально-відновлювального конвертера; наведено конструкторські розрахунки, виходячи з бажаної продуктивності газогенератора та властивостей біомаси; наведено перевірочні розрахунки удосконалених конструкцій вузлів на згин та міцність.

Четвертий розділ присвячено охороні праці та вимогам техніки безпеки.

П'ятий розділ присвячено економічним розрахункам.

Ключові слова: біомаса, гранули з кукурудзиння, газогенератор, окислювально-відновлювальний конвертер, газифікація.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 10 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПАЛИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ..... | 12 |
| 1.1. Вплив властивостей біомаси на ефективність процесу газифікації..... | 13 |
| 1.2. Вплив режимних параметрів процесу газифікації на ефективність виробництва генераторного газу з біомаси..... | 19 |
| 1.3. Аналіз паливних характеристик кукурудзиння..... | 24 |
| 1.4. Розробка технологічного процесу виробництва пелет з кукурудзиння..... | 29 |
| 1.5. Висновки до розділу 1..... | 34 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА..... | 35 |
| 2.1. Аналіз технологій виробництва генераторного газу з біомаси..... | 35 |
| 2.2. Розробка технологічної схеми виробництва генераторного газу з кукурудзиння..... | 42 |
| 2.3. Висновки до розділу 2..... | 45 |
| РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА..... | 46 |
| 3.1. Аналіз конструкцій газогенераторів та вибір прототипу..... | 47 |
| 3.2. Вибір прототипу окислювально-відновлювального конвертера та розробка методики його розрахунку..... | 50 |
| 3.3. Розрахунок конструкційно-технологічних параметрів газогенератора..... | 55 |
| 3.4. Обґрунтування конструкції газогенератора..... | 60 |
| 3.5. Висновки до розділу 3..... | 65 |

| | |
|---|----|
| РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА..... | 66 |
| 4.1. Вимоги техніки безпеки, які висуваються до мобільної газогенераторної установки..... | 66 |
| 4.2. Вимоги пожежної безпеки до мобільної модульної установки. | 70 |
| 4.3. Висновки до розділу 4..... | 73 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА..... | 74 |
| 5.1. Економічні розрахунки за проектом..... | 74 |
| 5.2. Висновки до розділу 5..... | 77 |
| ВИСНОВКИ..... | 78 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 79 |
| ДОДАТКИ..... | 86 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$k_{нов-роз.кор.}$ – коефіцієнт, що враховує наявність повітря-розподільної коробки для попереднього підігріву окисника до надходження в конвертер;

$C_{част.запас.}$ – кошти, витрачені на запасні частини до модернізованого модуля, грн;

$C_{матер}$ – кошти, витрачені на матеріали, щоб виготовити конвертер, колосникову решітку та корпус газогенератора, грн;

$\gamma_{нонл}$ – періодичність чищення бункеру для попелу, год (в середньому 9–12 год);

$R_{б}^1, R_{м}^1$ – річні експлуатаційні витрати від базової і модернізованої мобільної ГУ, в перерахунку на об'ємне виробництво газу, грн/ 10^3 м^3 ;

$\sum TC$ – сумарні відрахування (загалом 23%, в які входить 5% – розмір військового збору та 18% відрахування до ПДФО), грн;

$H_{кап.вкл.м.}^1, K_{кап.вкл.б}^1$ – супутні капітальні вкладення без урахування вартості модернізації при експлуатації базової та модернізованої ГУ, в перерахунку на об'ємне виробництво газу, грн;

$Q_H^{кукур}$ –теплота згоряння кукурудзиння (нижча), кДж/кг;

ψ – коефіцієнт втрат кукурудзиння при подачі в бункер ГУ;

ρ – насипна щільність біомаси, г/мл;

χ – значення коефіцієнту експлуатації ГУ залежно від тривалості роботи ГУ, $\chi=1,05$;

v – об'єм посудини, мл;

γ – періодичність надходження кукурудзиння до бункеру, год;

η – тепловий ККД мобільної ГУ;

$\gamma=1,35$ – коефіцієнт, який враховує доплати до посадового окладу;

$(R_{б} + E_{б})/(R_{м} + E_{м})$ – зміна терміну роботи модернізованої ГУ порівняно з базовою, год;

$v_{газ}$ – швидкість фільтрації газу, м/с;

$\rho_{кукур}$ – насипна щільність кукурудзиння, кг/м³.

$\psi_{отвір}$ – коефіцієнт витікання окисника (для фурм для конічного типу $\psi_{отвір}=0,84$; для циліндричного типу $\psi_{отвір}=0,67$).

$\rho_{попіл}$ – насипна щільність попелу, кг/м³;

$\Delta p_{ко́лос}$ – опір частини решітки з зазорами, кгс/м²;

$n_{полоч}$, $n_{ко́лос}$ – довжина полицок та колосників, м;

$S_{зазор}$, $S_{перег.}$ – площа суцільної частини колосника та зазору між ними, м²;

$m_{ко́лос}$, $\lambda_{ко́лос}$ – ширина суцільної частини колоснику і зазору між колосниками, м;

$B_{обл}$ – балансова вартість мобільної ГУ, грн;

$DC_{посад.окл}$ – посадовий оклад виробничника певного розряду за годину;

$DC_{прям.витр.}$ – прямі витрати на розробку конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора та їх виготовлення, грн;

$D_{г.-д.секції}$ – діаметр газо-дутьової секції конвертера, м;

$d_{г.о.р.}$ – діаметр горловини окислювально-відновлювального конвертера, м;

$D_{к.г.}$ – діаметр газогенераторного корпусу, м;

F – витрати на продукування 10³ м³ газу (загально-технологічні), грн;

F_m , $F_б$ – вартість 1 тис.м³ газу за модернізованою і базовою ГУ з урахуванням вищої теплоти згорання газу, грн/т·%;

G_2 , G_1 – приведені витрати на одиницю робіт за модернізованою та базовою мобільною ГУ, грн;

$G_m/ G_б$ – коефіцієнт росту об'ємного виробництва газу мобільною ГУ та його теплотворної здатності;

$h_{верх.секції}$ – висота верхньої секції конвертера, м;

$h_{г.-д.секції}$ – висота від газо-дутьової секції до горловини, м;

$H_{кап.вкл}$ – питомі капітальні вкладення, віднесені до тисячі кубометрів газу, грн;

$H_{кап.вкл.м.}$, $H_{кап.вкл.б}$ – питомі капітальні вкладення, віднесені до тисячі м³ газу, грн;

J – теплове напруження конвертера, кДж/м²·год;

$J_{н.ч.}$ – норма часу на виконання технологічних операцій, хв;

J_c – ставка за посадовими окладами, грн/год;

m – кількість отворів для монтажу дутьових фурм, шт;

m_2 , m_1 – вага посудини, наповнена біомасою та порожньої, г;

$n_{\text{сух.г.г.}}$ – кількість газу (сухого) виробленого з кукурудзиння, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 $\rho_{\text{ф}}$ – крок, з яким висвердлені отвори для монтажу фурм з метою підведення окисника в газо-дугтьову секцію, м;
 $Q_{\text{кукуруд}}$ – витрати кукурудзиння на виробництво газу, $\text{кг}/\text{год}$;
 $Q_{\text{об.газ}}$ – об'ємне виробництво газу мобільною ГУ, $\text{м}^3/\text{год}$;
 $Q_{\text{об.газ}}$ – об'ємне виробництво газу установкою, $\text{м}^3/\text{год}$;
 $Q_{\text{об.газ/рік}}$ – річне об'ємне виробництво газу модернізованою мобільною ГУ за поточний рік, натур. од.;
 $Q_{\text{об.окис}}$ – об'ємні витрати окисника (повітря) на процес газифікації, $\text{м}^3/\text{год}$;
 $R_{\text{б}}, R_{\text{м}}$ – частки відрахувань від балансової вартості на повну реновацію базової мобільної ГУ та модернізованої, грн;
 S – оплата праці виробничників, грн;
 $S_{\text{Qкукур}}$ – вартість кілограма кукурудзиння, грн/кг;
 SSC – єдині соціальні внески в розмірі 22%;
 $S_{\text{г-д.секції}}$ – площа поперечного перерізу газо-дугтьової секції окислювально-відновлювального конвертера, м^2 ;
 $t_{\text{шт(к)}}$ – штучно-калькуляційна норма часу, год;
 $v_{\text{окис}}$ – швидкість надходження окисника в газо-дугтьову секцію окислювально-відновлювального конвертера (складає 12,5 – 22 м/с);
 W – відносна вологість кукурудзиння, %;
 A – зольність кукурудзиння, % (по вазі);
 $A_{\text{зот}_{\text{газ}}}$ – вміст N_2 у виробленому газогенератором газі, %;
 $A_{\text{річн.}}$ – норма амортизаційних відрахувань за рік;
 E – економічний ефект (річний), грн;
 $E_{\text{м}}$ – коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень (нормативне значення складає 0,15);
 $K_{\text{н.в.}}$ – витрати накладні, грн;
 $H_{\text{кукур}}$ – висота реакційного шару кукурудзиння, м.
 $P_{\text{отв}}$ – периметр отвору, м;
 Φ – річний фонд роботи мобільної ГУ, год;
 $\rho_{\text{газ}}$ – густина газу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

ВСТУП

Сьогодні прогресивні країни світу взяли курс на декарбонізацію своїх енергетичних систем. Метою зеленого переходу є заміна викопного палива на відновлювані джерела енергії до 2035 р. Це сприятиме досягненню кліматичної нейтральності до 2050 р. [1]. З огляду на це, в різних галузях народного господарства відбувається стрімке зростання рівня використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси [2, 3]. Зазначене пояснюється географічною поширеністю біомаси та її високою доступністю в різних країнах [4]. Застосування біомаси в енергетичних цілях має низку переваг [5]. Зокрема, установки для переробки біомаси в енергію є конструкційно простими, легко обслуговуються, містять системи автоматичного контролю за параметрами процесу, працюють як автономно, так і є частиною складних систем [6].

Актуальність теми дослідження. Наукові дослідження в галузі виробництва енергії з біомаси [7, 8], стрімко зростають, через скорочення запасів вуглеводневих палив та суворі екологічні норми щодо вмісту в цих паливах забруднюючих речовин. За [9, 10] рослинна біомаса є четвертим за значенням видом палива (10% від усіх первинних ресурсів у світі). Якщо зазначити енергетично-перспективні види біомаси, то до них відносяться: відходи аграрної промисловості (солома, залишки від збирання та переробки соняшника, кукурудзиння, шкарлупа горіхів), швидкоростучі насадження (міскантус, верба, евкаліпт), деревина та відходи її технічної (лігнін) і механічної (тирса, стружка) переробки. Сучасне виробництво енергії з біомаси незначне (менше 4% в деяких країнах), хоча світове аграрне виробництво має суттєві запаси біомаси та її відходів [11].

З усіх методів переробки рослинної біомаси в енергетичних цілях саме її хіміко-термічна конверсія, зокрема газифікація, є найбільш перспективним напрямком [12], яка вирізняється високим термічним ККД (до 92%), мінімізацією зусиль на попередню підготовку палива до переробки, високою екологічністю технології, простотою технічного оформлення обладнання [13].

Проте, доступність більш дешевої сонячної та вітрової енергії спонукає до пошуку шляхів зменшення собівартості вихідної продукції процесу газифікації – генераторного газу та енергії, виробленої з нього. Одним з способів є протипотокова газифікація, яка дозволяє з високою енергетичною ефективністю термічно розкласти навіть дуже вологу біомасу (до 60%), отримуючи високоякісний енергетичний газ [14]. Станом на сьогодні досліджень, присвячених удосконаленню конструкцій протипотокових газогенераторів небагато, хоча технологія є перспективною. Отже, постає наукова задача удосконалити конструкцію протипотокового газогенератора з метою підвищення ефективності термічної переробки біомаси в горючий газ.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробити конструкцію газогенератора, що працює на пелетах з кукурудзиння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішувати такі *задачі*:

- провести аналіз фізико-механічних властивостей аграрної біомаси з метою її газифікації;
- провести аналіз технологій підвищення насипної щільності біомаси та розробити технологію виготовлення гранул з кукурудзиння;
- удосконалити конструкцію газогенератора під газифікацію гранул з кукурудзиння;
- розробити заходи з охорони праці і техніки безпеки при експлуатації газогенераторної установки;
- провести економічні розрахунки щодо доцільності виробництва енергії з генераторного газу в умовах аграрного підприємства

Об'єкт дослідження – технологічний процес газифікації біомаси.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструкційних параметрів газогенератора на ефективність виробництва газу з біомаси.

Практичне значення одержаних результатів: удосконалено конструкцію протипотокового газогенератора, що дозволило підвищити ефективність виробництва генераторного газу з біомаси.

Особистий внесок здобувача. основні дослідження за темою дипломного проекту отримані автором самостійно.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПАЛИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

З метою виробництва генераторного газу в якості сировини органічного походження використовують біомасу: деревинну та рослинного походження. Проте, деревина вважається вартісною сировиною, яку сучасні технології дозволяють повністю усю використовувати (разом з відходами) і меблевому виробництві, виготовленні будівельних матеріалів тощо. В Україні, як аграрній країні, в достатній кількості є рослинна біомаса аграрного походження. Як правило, для енергетичних цілей доцільно використовувати відходи рослинництва (кукурудзиння, соломку зернових, відходи переробки соняшника, горіхову шкарлупу, макуху олійних культур, лузгу насіння тощо). Через низьку насипну щільність та рихлу структуру, високий вміст мінеральних домішок та вологи, низьку теплоту згорання рослинну сировину виробники енергетичного сектора вважають некондиційним видом палива, яке потребує вартісної попередньої підготовки до її використання. Щодо логістики, то підприємства з переробки рослинної біомаси слід розташовувати в радіусі 30 км від місця її зростання, оскільки транспортування її на більші відстані не є рентабельним.

Зауважимо, що сучасний товаровиробник, щоб витримувати конкуренцію, має на меті знижувати собівартості продукції, таким чином зменшення вартості енергоносіїв є своєчасним і актуальним завданням. Тому отримання енергії із запасів наявної на підприємстві біомаси дозволить зменшити залежність від традиційних вуглеводневих палив, а прибутки, отримані через введення в енергетичний баланс відновлюваних джерел енергії, будуть сприяти самодостатності цього підприємства.

В наступних пунктах даного розділу буде розглянуто вплив властивостей аграрного рослинного палива на ефективність процесу газифікації та представлено технологічний процес виробництва паливних гранул з аграрної рослинної біомаси з метою підвищення її насипної щільності та теплоти згорання.

1.1. Вплив властивостей біомаси на ефективність процесу газифікації

Основні властивості біомаси, від яких залежить ефективність протікання процесу газифікації і якість генераторного газу наступні [25]: вміст летючих газів; вища та нижча теплота згоряння; вологовміст робочого палива; вміст золи і температура її плавлення; розмір і форма частинок біомаси, що термічно переробляється.

Автори наукової праці [14] свідчать, що виконавши елементарний аналіз зразків біомаси можемо говорити про те, що зольність біомаси та її вологість є основними параметрами, від яких залежать її паливні властивості. Якщо розглядати хімічний (по-елементний) склад рослинної біомаси, то він варіюється досить в обмежених рамках і від одного виду біомаси до іншого відмінність в хімічному складі не перевищує 6,5%, що підтверджено результатами інших досліджень [15, 16]. За наведеними трьома джерелами [14–16] середнє значення вищої теплоти згоряння сухих (вологість наближається до нуля) рослинних залишків аграрного виробництва у середньому складає 18,6 МДж/кг на суху беззольну масу. Загалом, в середньому, відмінність у значеннях нижчої та вищої теплоти згорання аграрної біомаси від одного до іншого виду сировини також не перевищує 10%.

Вплив вологості палива

Базовою характеристикою рослинної біомаси, яка визначає потенційну можливість газифікувати дану сировину є вологість [17]. Вологість палива під час процесу газифікації може виступати у якості двох факторів впливу: перший) волога, яка не прореагувала під час хімічних реакцій, і виступає теплоносієм; другий) вода, яка вступила в хімічні реакції і є реагентом.

На етапі підсушування палива в процесі газифікації значна частина вологи біомаси переходить у пару, і далі, у вигляді вологи, надходить в зони піролізу та окислювально-відновлювальну зони газогенератора. Частина вологи палива, яка брала участь в хімічних реакціях процесу в зоні піролізу та окислювальній зоні, частково відновлюється в зоні відновлення і, врахувавши високу теплоємність пари, у якості теплоти відводиться разом із вологим

генераторним газом, який відбирається з газогенератора. Коефіцієнт корисної дії процесу рекуперації теплоти зменшується за умови застосування повітряного (кисневого) дуття, оскільки частина теплоти втрачається з потоками повітря і газу. В протипотокових газогенераторах нагрівання бункера з рослинною біомасою здійснюється виробленим генераторним газом, який проходить через рекуператор, а не повітрям [18].

Якщо вологість палива перевищує 12–16% (оптимальне значення вологості для газифікації) втрати теплоти в процесі газифікації також зростають. Як правило, між вологістю біомаси та втратами теплоти існує пряма залежність. За дослідженнями [19] втрати теплоти прослідковуються через стінки окислювально-відновлювального конвертера. Максимальне значення ККД процесу досягається саме у зазначеному діапазоні вологості біомаси 12–16%.

Автори роботи [20] під час газифікації соломи-січки пшениці вологістю 30% в протипотоковому газогенераторі отримали, що максимальна теплота згоряння виробленого досягала лише 3100–3700 кДж/м³, при цьому ККД не перевищував 50%. Прискорити процес газифікації автори змогли застосувавши такий технічний прийом як змінну швидкість подачі повітря. До того ж використання вторинного повітря також дає можливість термічно переробляти біомасу з вологістю понад 30%.

За [21] газифікація аграрної біомаси з вологістю понад 40% можлива за умови використання двозонного окислювально-відновлювального конвертера, який містить технологічне звуження (горловину), та оснащений рядом (рядами) фурм для підведення окисника в зону реакції.

Аналіз робіт [17–21] свідчить, що чим вища вологість біомаси, тим нижчою є теплота згоряння виробленого газогенераторного газу. Використання вологої біомаси може погіршити стабільність процесу газифікації. Причиною є неможливість забезпечити рівномірне сушіння біомаси в усьому об'ємі паливного бункера. І ступінь погіршення стабільності процесу буде тим вищою, чим більш вологою є біомаса та чим більший поперечний переріз бункера газогенератора. Підвищити коефіцієнт корисної дії процесу газифікації можна

попередньою підготовкою біомаси (сушінням). В цьому випадку, як правило, використовують хімічну енергію, отриману при виділенні летких компонентів. Швидкість займання біомаси в бункері газогенератора та інтенсивність проходження реакцій по висоті шару біомаси також є залежними від її вологості. Загалом, вологість біомаси визначає ефективність, кінетику і динаміку генераторного процесу. Розуміння взаємозалежності між вологістю біомаси та параметрами генераторного процесу дає змогу підвищити ефективність усього процесу шляхом розробки раціональних конструкцій газогенераторів та регулюванням режимних параметрів процесу.

Вплив розмірів частинок біомаси

Оскільки рослинна біомаса, завдяки різноманітному походженню має багато різних форм і розмірів, то в технологіях хіміко-термічного розкладання біомаси під визначенням «розмір частинок» біомаси приймають не гранулометричний склад, а більш наближений термін – середній розмір частинок палива. Залежно від типу та принципу роботи газогенератора обирається розмір палива. Однак наявні способи підготовки палива частково нівелюють таку залежність. Якщо розглядати як паливо солону-січку, яка газифікується в газогенераторах з суцільним шаром, то процес її термічного розкладання ускладнений через високу щільність залягання соломин в бункері газогенератора, що спричиняє підвищення гідравлічного опору шару та сприяє інтенсивному виносу твердих частинок. Суттєво знизити такий недолік дозволяють технології гранулювання та брикетування [22]. Якщо мова йде про установки з киплячим чи псевдо-зрідженим шаром, то частинки біомаси, навпаки, потрібно буде ще зменшити в розмірі до 1...1,5 мм. Зазначене можна реалізувати за допомогою подрібнювачів сировини. Також розмір частинок біомаси залежить від розмірів реакційних конвертерів та продуктивності газогенераторних установок. Через неправильно обраний розмір частинок біомаси, порозність паливного шару в пристінковому просторі та центрі камери газифікації газогенератора різнитиметься, отже матиме місце нерівномірний розподіл дуття в перерізі камери і, як наслідок, нерівномірне протікання окислювально-відновлювальних реакцій процесу, спрямованих на формування

CO та H_2 у газі. Прозність шару біомаси потрібно також розраховувати виходячи з розмірів бункера установки. Проте, коли співвідношення діаметрів бункера і частинки палива є більшим за двадцять, порозністю шару можна нехтувати, оскільки вона вже не залежить від розмірів бункера [23].

Вище зазначене підтверджено результатами імітаційного моделювання [24]. Автори дослідили вплив хіміко-фізичних параметрів біомаси та конструкції установки на її експлуатаційну спроможність. За результатами моделювання з усієї сукупності змінних факторів процесу (керуючих) вологість біомаси і середній розмір її частинок мають найвищий вплив на експлуатаційну спроможність газогенератора. Якщо є потреба газифікувати частинки біомаси більшого розміру, щоб не нести втрати в продуктивності за газом, висоту активної зони окислювально-відновлювального конвертера потрібно збільшити. Отже, протипотокові газогенератори, в яких конструкційно закладено невисоку активну зону, передбачають використання дрібнодисперсного палива.

В протипотокових газогенераторах [25], які мають камери газифікації зі звуженням (горловиною), на зразок пісочного годинника, та центральну чи периферійну (але в перерізі горловини) подачу окисника (кисень/повітря) збільшення розмірів палива призводить до зростання вмісту H_2 і CO в газах.

За [26] в газогенераторах з киплячим чи псевдозрідженим шаром має місце винесення частинок палива із робочої зони разом з виробленим газом, який примусово відбирається, тому часто спостерігається таке явище як хімічне недоспалювання частинок палива. В цьому випадку при зменшенні розмірів частинок слід забезпечити відповідну подачу окисника, щоб частинки циркулювали в потоці окисника, а, за необхідності забезпечення додаткової теплоти, потрібно в установку вводити інертні добавки. Також існує залежність кількості виробленого газу від розміру палива. При подрібненні частинок біомаси з 0,65...0,95 мм до 0,15...0,35 мм кількість виробленого газу зростає, а тривалість перебування частинок в активній зоні скорочується. Від розміру частинок біомаси залежить і кількість смол, які виділяються в процесі газифікації. Менші за розміром частинки біомаси спричиняють концентрацію смол у верхній частині камери газифікаційної (де смолисті продукти не

зазнають термічного розкладання) та пришвидшення виділення летких сполук. За результатами експериментальних досліджень зменшення частинок палива з 12×12 мм до 2×2 мм призвело до зростання вмісту смол у генераторному газі на 15%. Також при менших розмірах палива зростає швидкість газифікації біовугілля (вугільного залишку), оскільки морфологія поверхні біовугілля впливає на швидкість зменшення його маси. При менших розмірах палива швидкість його прогрівання зростає, що супроводжується покращенням реакційної здатності вугільного залишку і, як наслідок, інтенсифікується процес вивільнення летких сполук.

Розглянемо ще такий параметр палива, як його форма. Від форми частинок палива залежить тривалість протікання процесу піролізу біомаси в газогенераторі. Частинки палива більш складної геометричної форми краще піддаються процесу їх термічного розкладання.

Виходячи з аналізу робіт [22–26] зробимо висновок, що зменшення розміру палива покращує газифікацію біомаси, зростає площа реакційної поверхні палива, інтенсифікується вивільнення летких сполук.

Вплив властивостей золи

Рослинна біомаса аграрного походження, на відміну від деревної біомаси, має високу зольність (до 7% на суху масу – для лузги проса), тому наявність золи в значній кількості та її здатність до плавлення чинить безпосередній вплив на ефективність процесу газифікації та роботу газогенератора. Наявність в біомасі значної кількості золи потребує розробки спеціальних зольників збільшеного об'єму, оснащених засобами видалення золи з робочої зони (шнеки, транспортери), що тягне за собою додаткові фінансові витрати. Також недоліком аграрної рослинної біомаси є низька температура плавлення золи, що є причиною передчасного виходу з ладу вузлів газогенераторної установки (окислювально-відновлюваний конвертер, конвективні поверхні нагрівання).

В Україні діють такі стандарти як DIN 51730, ISO 540 та ASTM D 1857, за якими можна визначити температуру плавлення золи.

Одним з найбільш застосовуваних є ASTM D 1857. Він дозволяє, залежно від температури нагрівання частинок біомаси в окислювальному середовищі, фіксувати зміни форми конуса золи (стандартного) (рис. 1.1) [26].

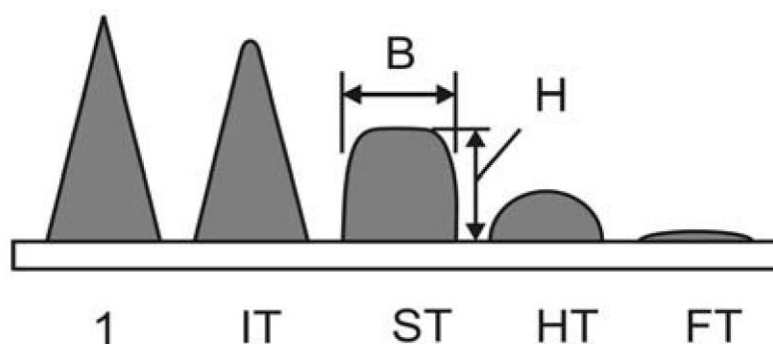


Рис. 1.1.Форми, які приймає конуса золи біомаси при впливі температури [26]:

FT – точка, коли зола починає розтікатися;

HT – ($0,5 \cdot B = H$), точка коли конус стає півсферою;

ST – ($H = B$), температура розм'якшення золи;

IT – початок деформації під впливом температури;

1 – початковий стан золи (нагрівання відсутнє).

Залежно від виду аграрної біомаси, вмісту домішок, умов та місцевості здатність золи до плавлення варіюється в досить широких межах [26]:

- точка, коли зола починає розтікатися – $1230 \dots 1370^{\circ}\text{C}$.
- точка коли конус стає півсферою – $1200 - 1350^{\circ}\text{C}$;
- температура розм'якшення золи – $1180 - 1320^{\circ}\text{C}$;
- початок деформації під впливом температури – $1110 - 1250^{\circ}\text{C}$;

Виходячи з даних, наведених за [26], такі рослинні відходи аграрного виробництва як шкарлупа горіхів та лузга насіння мають високі температурні діапазони на кожному етапі плавлення золи, починаючи з 1250°C (початок деформації) і закінчуючи 1370°C (точка розтікання золи), що не викликає відкладення золо-шлакових агломератів на поверхнях окислювально-відновлювального конвертера, колосникової решітки та інших елементах обладнання газогенератора, то солома зернових, має низький температурний поріг плавлення золи, що потребує підтримки певного режиму термічного

розкладання сировини, постійно підтримуючи температуру в реакційній зоні нижчою за точку плавлення золи соломи.

Також на схильність золи до плавлення має суттєвий вплив її мінеральний склад. На жаль, навіть сучасне апаратне забезпечення профільних лабораторій не дозволяє встановити схильність золи до плавлення залежно від хімічного складу палива. Як правило, для встановлення температурного діапазону, в якому протікає плавлення золи певної аграрної біомаси, досі застосовують експрес аналіз проб [26].

Вплив об'ємної щільності біомаси

Об'ємна щільність біомаси є ще однією важливою характеристикою біомаси як палива, від якої залежить теплотворна здатність в одиниці об'єму. Об'ємну масу палива, яке підлягатиме газифікації, з подальшим розрахунком нижчої теплотворної здатності, як правило визначають виходячи з сухої частини в робочому об'ємі палива. На відміну від теплоти згоряння вміст сухої частини в робочому об'ємі біомаси від вологості майже не залежить [27].

Насипна щільність біомаси розраховується як [27]:

$$\rho = v^{-1} \cdot (m_1 - m_2), \quad (1.1)$$

Оскільки дисперсні, капілярно-пористі види сировини, до яких належить біомаса, є гігроскопічними, то насипна щільність буде змінюватися залежно від вологості біомаси. Отже вологість біомаси є одним з регулювальних параметрів процесу газифікації.

1.2. Вплив режимних параметрів процесу газифікації на ефективність виробництва генераторного газу з біомаси

Окрім фізичних та механічних властивостей палива на процес газифікації чинять вплив його конструкційно-технологічні параметри. Від конструкційно-технологічних параметрів процесу газифікації залежать: температурна напруженість перерізу окислювально-відновлювального конвертера; хімічний склад, теплота згоряння та вміст смолистих і мінеральних домішок в газі; ККД перетворення хімічної енергії біомаси в енергію газу; неповнота розкладання

біомаси та ступінь винесення механічних часточок біомаси з зони реакцій з газом, який примусово відбирається з газогенератора.

До конструкційно-технологічних параметрів газогенератора, які впливають на ефективність процесу газифікації відносяться [28]:

1) тип окислювально-відновлювального конвертера, який є основним вузлом газогенератора, в якому протікають окислювально-відновлювальні реакції, геометричні і конструкційні параметри окислювально-відновлювального конвертера;

2) параметри дуття (температура, хімічний склад, відносна витрата, інтенсивність подачі);

3) тиск в газогенераторі, який залежить від узгодженості розмірів частинок палива і об'єму та швидкості надходження дуття;

4) температурний режим як в усьому газогенераторі, так і в кожній з його зон (підсушування, піролізу, окислювання і відновлення).

Вплив інтенсивності подачі дуття

Під параметром інтенсивність надходження окисника в зону реакцій приймемо швидкість холодного дуття (лінійне значення). Якщо окислювально-відновлюваний конвертер має горловину (звуження) на зразок протипотокового газогенератора, то для розрахунків береться швидкість у найвужчому місці окислювально-відновлювального конвертера (камери газифікації). Зміною кількості дуття регулюється швидкість дуття. Окисник в окислювально-відновлюваний конвертер надходить через фурмовий пояс. Тому, можна змінювати як кількість фурм фурмового поясу, так і їх діаметр. Більш складним технічним прийомом є варіювання діаметром окислювально-відновлювального конвертера, діаметром горловини, або їх відношенням.

Ще в середині 19 століття вченими експериментальним шляхом встановлено вплив інтенсивності дуття швидкість протікання окислювально-відновлювальних реакцій процесу термічного розкладання палива. Результати цих досліджень лягли в основу дифузійно-кінетичної теорії горіння твердого палива [28]. Як правило, у міру збільшення швидкості дуття температура на рівні фурмового поясу росте, що призводить до зростання теплоти згоряння

генераторного газу. При сталому об'ємі газів дуття, які надходять в окислювально-відновлюваний конвертер, ріст температури на рівні фурмового поясу обґрунтовується інтенсивним вигоранням продуктів піролізу, які надходять із шарів палива, розташованих вище рівня фурм. Для запобігання неправильному розподілу газів дуття в пристінковому просторі окислювально-відновлювального конвертера, де порозність шару біомаси є вищою, порівняно з його центральною частиною, діаметр горловини конвертера потрібно зменшувати, при цьому зберігаючи пропорції із зовнішнім діаметром окислювально-відновлювального конвертера та враховуючи розмір частинок біомаси. Завдяки звуженню горловини повітря краще надходить до центру окислювально-відновлювального конвертера. При цьому температура в активній зоні конвертера зростає тому що леткі сполуки, які вивільнилися з палива, повністю згорають. Вище описане сприяє винесенню виділеної в результаті протікання екзотермічних реакцій зони окислення теплоти у відновлювальну зону конвертера. При цьому теплотворна здатність газу зростає. Надмірне зменшення діаметра горловини може призвести до зависання біомаси в цій частині окислювально-відновлювального конвертера через порушення рівномірності її усадки [29]. Збільшення кількості та швидкості газів дуття, які надходять в окислювально-відновлюваний конвертер, не лише підвищує теплоту згорання газу, а й збільшує в ньому вміст таких горючих компонентів як водень і монооксид вуглецю. Як правило, вміст водню в газі збільшується не так швидко, як зростає частка окису вуглецю [29]. Для збільшення вмісту водню потрібно в газогенератора подавати пару, тоді як вміст СО залежить лише від повноти згорання палива, яка в свою чергу, залежить від температури в реакційних зонах. Наявність горловини в окислювально-відновлювальному конвертері та інтенсивного надходження окисника в зону реакцій призводить до більш повного розкладання смол (через високий температурний режим). Для кожного газогенератора існує свій оптимальний діапазон швидкостей дуття. При менших чи вищих за цей діапазон швидкостях дуття температура в окислювально-відновлювальному

конвертері є недостатньо високою, що є причиною неповного вигорання продуктів піролізу в пристінковій ділянці конвертера.

У роботі [30] досліджувався процес газифікації в прямопотоковому газогенераторі з суцільним шаром. Автори роботи відзначають, що при збільшенні швидкості дуття з 0,02 до 0,08 м/с спостерігається ріст вмісту CO з 25 до 30%, з одночасним зменшенням вмісту CO₂. Водночас концентрація H₂ залишається на рівні 7–8% і CH₄ на рівні 2%. Це обґрунтовується тим, що в нижній частині окислювально-відновлювального конвертера газу дуття вступають у взаємодію з шаром біовугілля і збільшення швидкості дуття призводить до підвищення температури в шарі біовугілля, що сприяє відновленню CO₂ до CO. Одночасно збільшується винесення теплоти із активної зони в зону піролізу. Вмісту H₂ і CH₄ в вироблених газах є майже незмінним.

Вплив температури газів дуття

В технології газифікації для інтенсифікації хіміко-термічної конверсії біомаси в горючий газ часто використовують такий технічний прийом як нагрівання газів дуття. Найчастіше цей технічний прийом використовують при паро-повітряній газифікації біомаси з метою надходженні в зону реакцій додаткової теплоти ззовні. В праці [31] досліджували пароповітряну газифікацію біомаси в установці з циркулюючим киплячим шаром. Проведені авторами дослідження показали, що за постійного коефіцієнта витрати окиснювача (0,7), перехід з повітряного дуття на пароповітряне (з відношенням повітря/пара 0,56) збільшило вищу теплоту згоряння газу з 1,7 до 3,3 МДж/м³. Також зазначено, що збільшення інтенсивності подачі повітря за постійної витрати пари, сприяє більш повному розкладанню вологи в процесі газифікації (температура в окислювально-відновлювальному конвертері зростає). При цьому зростає і ефективність процесу газифікації, і теплота згоряння газу.

Застосування пароповітряного дуття може бути одним із можливих методів збільшення ефективності та стабільності процесу газифікації аграрної біомаси. Воно сприяє зниженню температури в зоні окислення, чим запобігає

процесам шлакування і забезпечує рівномірне видалення золи з шару. Додаток пари до дуття збільшує хімічний ККД процесу газифікації біомаси.

Вплив хімічного складу газів дуття

Хімічний склад газів дуття можна розуміти і як склад газів компонентний, і як відносний вміст окремих компонентів у газі. В якості газів дуття можна використовувати: повітря, збагачене киснем або парою; пароповітряні суміші; паро-кисневі суміші; суміші з повітря та продуктів згоряння [32].

Крім зазначених газів дуття можна використовувати суміш на основі повітря з генераторним газом або кисню з природним газом. Такі технологічні прийоми передбачають рециркуляцію газів дуття. Спалювання таких сумішей всередині окислювально-відновлювального конвертера, підвищує температуру в активній зоні, прискорюючи окислювально-відновлювальні реакції та збільшуючи теплоту згоряння газу і ККД процесу [32].

Насичення газів дуття O_2 потребує застосування спеціальних установок, що значно здорожує кінцевий продукт (газу). Також в процесі кисневої газифікації через високу ймовірність окиснення робочих поверхонь трубопроводів та повітророзподільних коробок фурмових поясів окислювально-відновлювальних конвертерів та високотемпературну корозію внутрішніх поверхонь вузлів та деталей, де протікають окислювально-відновлювальні реакції процесу, потрібно для виготовлення деталей газогенератора використовувати дорогі легировані матеріали.

Станом на сьогодні повітря найбільш широко використовується в процесі газифікації в якості агенту дуття, оскільки є доступним, безкоштовним, не потребує попередньої підготовки. Отриманий в результаті такої (повітряної) газифікації отримуємо генераторний газ з високим вмістом баластного азоту з низькою теплотою згоряння, що не перевищує 6 МДж/м^3 [33].

Пароповітряне дуття використовують, коли стоїть завдання отримати газ з високим вмістом H_2 . На відміну від повітряного газу одержуваний (водневий) газ має високу теплотворну здатність ($12,5 \dots 25 \text{ МДж/м}^3$) і не містить N_2 за достатнього ступеня конверсії пари. Також присадка пари до повітряного дуття дозволяє вести режим газифікації біомаси в температурному режимі нижчому

за температуру початку деформації золи (до 1000°C). До газифікації вологої біомаси з високим вмістом гігроскопічної і піролітичної вологи пароповітряна газифікація не застосовується. Пароповітряну газифікацію найчастіше застосовують при газифікації палив на основі соломи зернових, оскільки з усіх видів аграрної біомаси солома має найнижчу температуру плавлення золи [33].

1.3. Аналіз паливних характеристик кукурудзиння

В Україні найбільшою сировинною базою є аграрна промисловість. Сімдесят відсотків земельного фонду України займають угіддя сільськогосподарського призначення, що складає понад сорок два мільйони гектарів. Таким чином для енергетичних цілей слід використовувати рослинні залишки аграрного виробництва, оскільки вони мають високу здатність до відтворення, широко поширені майже в усіх регіонах країни, легко перетворюються в різні види палив (тверде, рідке, газоподібне), з яких надалі виробляють енергію (теплову, силову, електричну), а також під термічну переробку цієї сировини легко адаптувати існуючі зразки теплотехнічного обладнання. На рис. 1.2 наведено класифікацію рослинних залишків аграрного походження, які можна використовувати в якості палива [34].

Кукурудза є другою після зернових (пшениця, жито) культурою, яка вирощується в Україні. Потенціал доступної кількості кукурудзиння (стебел кукурудзи) на потреби енергетичної галузі оцінюються (поряд з щорічним доступним обсягом), її хімічним складом (вуглець – 45,5 %; водень – 5,5 %; азот – 0,69 %; кисень – 41,5 %; сірка – 0,04 %; хлор – 0,2 %), паливними характеристиками (нижча теплота згорання при вологості 18% – 16,7 МДж/кг, вміст летючих речовин – 67%, температура плавлення золи – 1050...1200°C) та умовами вирощування (кліматичними умовами, часом збирання та географічним положенням) [34]. Свіжозібрані стебла кукурудзи містить у три рази більше хлору, ніж після двотижневого висушування на сонці (0,2%). З усіх видів аграрної біомаси в стеблах кукурудзи вміст хлору є найнижчим.

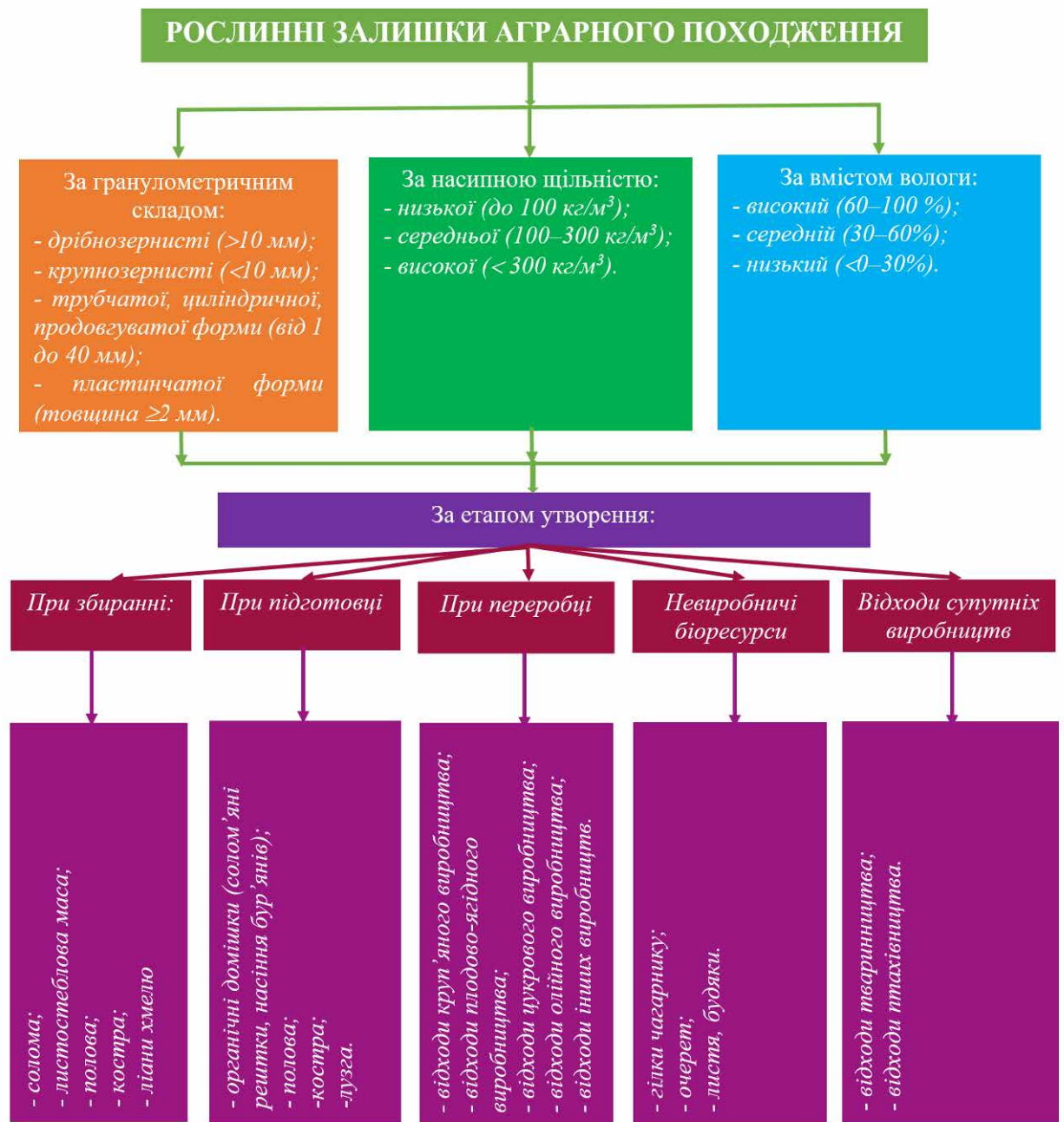


Рис. 1.2. Класифікація рослинних залишків аграрного походження [34]

Придатність рослинних залишків аграрного походження до хіміко-термічної конверсії в генераторний газ визначається за її паливними властивостями, а саме: вмістом баласту (вологи, сірки, мінеральної частини золи), механічними показниками (міцністю, щільністю, розміром частинок/дисперсністю), парусністю, реактивною здатністю, теплотворною здатністю в одиниці об'єму [34].

Розглянемо баластні компоненти в складі аграрної біомаси. В період жнив вологість біомаси може складати 50...65 %. Зберігання біомаси в ангарах

чи під провітрюваними накриттями знижує вологість біомаси до значень рівноважної вологості (залежно від пори року вона складає 10 – 20 %).

Кукурудзиння досить довго запалюється і погано, порівняно з соломою озимої пшениці, горить, оскільки вміст в кукурудзинні летючих найнижчий з усіх видів аграрної біомаси і складає всього 67% порівняно, наприклад із соломою зернових (72 – 80,5 %).

Зольність у кукурудзиння висока і становить 6–9 % (залежно від сорту рослини), в порівнянні з соломою (4 – 6 %), проте не найвища. З усіх залишків аграрного виробництва найвища зольність у стебел соняшника (10–12%).

Щойно зібране і підсушене на повітрі кукурудзиння відноситься до незадовільного четвертого класу за паливною якістю. Така сировина має низьку насипну щільність (25 – 35 кг/м³). З метою підвищення насипної щільності кукурудзиння можна або подрібнити, або переробити на паливні брикети чи пелети. В такому випадку насипна щільність кукурудзиння може зрости до 110–170 кг/м³ (подрібнена на січкарні) та 570–640 кг/м³ (пелети) відповідно.

Щодо логістичних питань, то для процесу газифікації раціональним є переробляти кукурудзиння поблизу місця його утворення. Максимальна відстань транспортування не повинна перевищувати 30 км. Також відстань транспортування визначає потребу в автомобілях та паливно-мастильних матеріалах, місце вирощування кукурудзи – потреби в збиральній сільськогосподарській техніці, а складність збирання – потреби в паливно-мастильних матеріалах. Ущільнення та зберігання кукурудзиння (обґрунтоване виробничими умовами) потребуватиме додаткових капіталовкладень. Теплота згорання стебел кукурудзи становить 5–8 МДж/кг (при вологості 45...60%) та 15–17 МДж/кг (при вологості 15...18%), що практично наближається до теплоти згорання деревної біомаси 18–21,5 МДж/кг і торфу 19–26 МДж/кг [35]. Теплота згорання кукурудзиння залежить від його хімічного складу, що залежить від місця та умов вирощування кукурудзи. Якщо розглянути вміст горючих компонентів в кукурудзинні, то найвищу теплоту згорання 14,7 МДж/кг має целюлоза, трохи нижчу дубильні речовини, лігнін, смоли і,

найнижчу – клітковина. В таблиці 1.1 для порівняння наведено паливні характеристики аграрної біомаси (зольність та теплота згорання) [35].

Таблиця 1.1

Паливні характеристики аграрної біомаси [35]

| Вид рослинних залишків аграрного виробництва | Теплота згорання (нижча) кукурудзиння з вмістом вологи 20%, МДж/кг | Вміст золи в сухій масі, % | Теплота згорання (нижча) сухої маси кукурудзиння, МДж/кг | Формула знаходження величини теплоти згорання, МДж/кг |
|--|--|----------------------------|--|---|
| Кукурудзиння | 16,7 | 8,0 | 17,0 | $16,311 - 0,1901 \cdot W$ |
| Солома вівса | 12,85 | 4,86 | 16,9 | $16,258 - 0,1789 \cdot W$ |
| Солома житня | 13,57 | 4,48 | 17,2 | $15,298 - 0,1762 \cdot W$ |
| Солома ячмінна | 13,38 | 4,4-6,0 | 17,5 | $16,889 - 0,2001 \cdot W$ |
| Солома пшенична | 13,52 | 6,7 | 17,9 | $16,257 - 0,1902 \cdot W$ |
| Солома ріпаку | 15,8 | 5,9 | 17,0 | $17,511 - 0,2014 \cdot W$ |
| <i>Середнє значення по соломі</i> | <i>13,45</i> | <i>4,9</i> | <i>17,5</i> | – |
| Стебла соняшника | 14,4 | 11 | 16,0 | $1026 \cdot H^P + 341 \cdot C^P - 22 \cdot W^P - 104(-S^P + O^P)$ |
| Льонокостра | 18,6 | 6,2 | 22,0 | $1026 \cdot H^P + 341 \cdot C^P - 22 \cdot W^P - 104(-S^P + O^P)$ |
| Лузга проса | 15,6 | 7,2 | 18,1 | $1026 \cdot H^P + 341 \cdot C^P - 22 \cdot W^P - 104(-S^P + O^P)$ |

До складу летючих речовин кукурудзиння відносяться: складні вуглеводневі сполуки, азот, двоокис та окис вуглецю та водень [35].

Оскільки вміст летючих речовин в кукурудзинні невисокий (67%), то при проектуванні газогенератора достатньо забезпечити стандартний розмір корпусу та конвертера для їх утилізації. Температура початку виділення летючих речовин з кукурудзиння складає, залежно від сорту кукурудзи, 115 – 135°C. Обсяг газів дуття на процес газифікації та швидкість їх подачі потрібно розраховувати виходячи з хімічного складу і кількості летючих речовин в кукурудзинні, геометричних параметрів газогенератора та основних його вузлів, а також із продуктивності газогенератора за газом [35].

Кукурудзиння має коксовий залишок порошкоподібного типу. Для його усунення із робочої зони чи зольника достатньо використовувати класичні одиниці обладнання (шнеки, транспортери). Також в газогенераторах для просіювання золи достатньо використовувати двосекційні колосникові решітки, одна з яких є рухомою. Для усунення явища газонепроникності палива потрібно постійно усувати золу з робочої зони, щоб її надмірна кількість не призводила до зростання опору в системі [35].

Якщо газогенератор працює при високих температурах, слід слідкувати за температурою плавлення золи, яка залежить від складу золи (кремнезем, вапно, глинозем). Загалом за ступенем плавкості зола поділяється на туго-, середньо- та легкоплавку. Температурний діапазон початку утворення золо-шлакових агломератів для легкоплавкої золи складає – 1010...1235 °С; середньо-плавкої – 1160...1395 °С; тугоплавкої 1515...1830 °С. Кукурудзиння має середню температуру початку шлакування (1160 – 1395 °С), яка схожа на спечений порошок. Характеристика зольного залишку включає такі важливі показники як протяжність зони плавлення і швидкість рекристалізації. Кукурудзиння під час горіння утворює короткі шлаки, які швидко кристалізуються і застигають через високий вміст F_2O_3 , FO_2 , Ca і низьким вмістом Si. Характеристика зольного залишку наведена в Додатку 1, таблиці 1 [35].

Якщо розглядати екологічну сторону питання, то кукурудзиння відноситься до екологічно-чистого виду палива. За теплотворними властивостями кукурудзиння не поступається традиційним викопним видам палива, особливо якщо порівнювати теплотворну здатність пелет з кукурудзиння (19,1 МДж/кг) з торфом (22,5 МДж/кг) чи кам'яним вугіллям (25 МДж/кг). При цьому вміст сірки в кукурудзинні (0,2 %) значно нижчий ніж у викопних видах палива, наприклад кам'яного вугілля (до 3,5%).

Проаналізувавши переваги та недоліки кукурудзиння як палива зробимо заключення, що для підвищення насипної щільності, механічної міцності та зменшення вологості цієї сировини до 20% (оптимальна для процесу газифікації) його потрібно попередньо підготувати, а саме – виготовити плети, які відповідатимуть новому європейському стандарту EN plus-A1.

1.4. Розробка технологічного процесу виробництва пелет з кукурудзиння

Пелетування – це технологічний процес виробництва паливних гранул шляхом пресування рослинної біомаси. Станом на сьогодні в Україні відсутні національні стандарти якості на пелети, тому наведемо деякі європейські стандарти, згідно з якими в Україні виробляються пелети:

- a) SS 187 120 – шведський стандарт на пелети;
- b) SN 166000 – швейцарський стандарт на пелети та брикети;
- c) DIN 51731 – німецький стандарт на пелети та брикети;
- d) ONORM M 7135 – австрійський стандарт на пелети і брикети.

Залежно від виду стандарту, згідно якого виробляються пелети вони мають форму циліндра з діаметром в межах 4...25 мм та довжиною до 100 мм. Через низький вміст сірки, азоту, хлору, свинцю, кадмію тощо пелети з кукурудзиння вважаються екологічно чистим видом палива порівняно з вугіллям чи паливами нафтового походження. Пелети мають високу енергетичну щільність, що дозволяє забезпечити значну кількість енергії при їх термічному розкладанні [36].

Пелета виробляється в спеціальних установках шляхом витискання кукурудзиння роликками через отвори матриці при температурі 245...365°C. Лігнін (клейка речовина) при такій температурі під тиском починає виділятися з сировини, склеюючи її частинки в пелету, теплота згорання якої складає близько 19 МДж/кг [36].

Перевагою пелет з кукурудзиння порівняно, наприклад, з деревними пелетами, є їх низька вартість завдяки значним запасам цієї сировини на аграрних підприємствах України. Основним недоліком пелет з кукурудзиння залишається висока зольність (6...9%) [36].

При виробництві пелет до вихідної сировини та до виготовленої кінцевої продукції (пелет) ставляться, відповідно до стандарту, певні вимоги.

Щодо пелет, то вони повинні бути: однакового розміру та геометричної форми; мати гарну механічну міцність (не тріскатися, не осипатися); вміст домішок та вологи не повинен перевищувати меж, зазначених в стандарті; колір, поверхня та структура повинні бути однорідними, що свідчить про раціонально обраний режим (тиск, температура, час) їх виготовлення; цвіль, хімікати та грибок повинні бути відсутніми; вміст механічних домішок (металеві включення, земля, пісок, пил) також не повинен перевищувати меж, зазначених в стандарті. Насипна щільність пелет повинна складати 550...650 кг/м³; відсутність осипання, викривлення та тріщини в пелеті; поверхня пелети має бути рівною [37].

Щоб забезпечити високу якість пелети до вихідної сировини також ставлять високі вимоги, тому, як правило, її потрібно попередньо підготувати до використання. Кукурудзиння перед пресуванням, щоб досягти вологості 18–25% потрібно або просушити на відкритому повітрі, або в барабанах. Останній варіант здорожує вартість пелети та сповільнює виробництво. Також потрібно провести попередній аналіз на вміст лігніну в сировині (клейка речовина природного походження), при низькому вмісті лігніну при виробництві пелети потрібно, або додавати штучні клейкі речовини, або готувати суміші на основі кукурудзиння з додаванням соломи, тирси, тощо. Також лігнін відповідає за міцність пелети. Для мінімізації вмісту домішок в пелеті сировину потрібно перед використанням ретельно очистити від будяків, каміння, землі, піску, металевих включень тощо. Це також убезпечить пресувальне обладнання від поламок, подряпин та інших пошкоджень [37].

Розробимо технологічний процес виробництва пелет з кукурудзиння.

Для реалізації технологічного процесу виберемо комплекс пелетування КПББ-3 (рис 1.3), який модернізуємо новими одиницями обладнання:

1) *секція подрібнення кукурудзиння*: система керування секцією попереднього подрібнення сировини; бункер для кукурудзиння; подавальний пристрій кукурудзиння; подрібнювач стебел ПСЕ-2,6 ДТЗ (або подрібнювач біомаси KS650); скребковий транспортер; подавальний стіл, оснащений стрічковим транспортером (стеблова та листова маса кукурудзиння).

2) *секція сушіння та остаточного подрібнення кукурудзиння*: теплогенератор; транспортер (скребковий) для надходження попередньо подрібненого кукурудзиння до теплогенератора; транспортер (скребковий) для повторно подрібненого кукурудзиння; бункер для подрібненої сировини; транспортер (скребковий) для надходження кукурудзиння до барабанної сушарки; інерційний очищувач сировини від домішок (циклон); транспортер (шнековий) для видалення з сушарки сухого подрібненого кукурудзиння; бункер для сухого двічі подрібненого кукурудзиння; шнек для транспортування сухого кукурудзиння в дробарку молоткового типу, дробарка молоткова; лінія переміщення подрібненого кукурудзиння (норія, транспортер шнековий, два пульти керування – барабаном і секцією підготовки кукурудзиння).



Рис. 1.3. Комплекс пелетування біомаси[38].

3) *Секція виготовлення пелети*: прес-пелетярня; парогенератор, бункер пелетярні.

4) *Секція отримання кінцевого продукту (пелет товарних)*: пульт керування; лінія перенесення (охолоджувач пелет, норія, циклон, магістраль пневматична, вентилятор); лінія просіювання і вивантаження пелет (норія, циклон, магістраль пневматична); дозатор; ємність для вироблених пелет; платформа вагова (діапазон 1000, 750, 500 кг); верстат пакувальний; упаковка.

Технологічний процес включатиме наступні операції:

1. Попереднє подрібнення кукурудзиння є першою операцією технологічного процесу, яка спрямована на наданні кукурудзинню заданого розміру частинок і підготувати до попереднього просіювання та очищення від органічних та механічних домішок, що зменшить витрати енергії пелетярні. Для подрібнення кукурудзиння найкраще використовувати подрібнювач стебел ПСЕ-2,6 ДТЗ, або більш універсальне обладнання – подрібнювач біомаси KS650. Подрібнювач стебел ПСЕ-2,6 ДТЗ має високу продуктивність 600–800 кг/год, дозволяє подрібнити стебла кукурудзи від 5 до 80 мм, при цьому потужність подрібнювача складає 2,6 кВт. Потрібно зазначити, що якість дроблення залежить не лише від попереднього підготування сировини – очищення, підсушування, але й від технічного стану подрібнювача, якості його налагодження на роботу та правильності експлуатації.

Для отримання високої якості подрібнення подрібнювачу також потрібно своєчасно проводити ТО та ремонт. Для транспортування кукурудзиння в секції 1 передбачено скребковий транспортер та подавальний стіл, оснащений стрічковим транспортером. Подрібнене кукурудзиння після секції 1 транспортером надходить до секції сушіння та остаточного подрібнення.

2. Сушіння кукурудзиння та повторне подрібнення. Попередньо очищене та подрібнене кукурудзиння транспортером скребкового типу транспортується до теплогенератора, з якого кукурудзиння транспортером скребковим для стебло-листової сировини надходить до змішувального бункера, звідки подається до барабану сушильного. Температура повітря, яке використовується як агент сушіння, становить (230...380°C) і до барабану надходить від котла через повітряні рукава. Після цього просушене кукурудзиння (вологість не перевищує 8–12%) надходить до циклону з метою очищення від органічних та механічних домішок. Для того, щоб відпрацьоване повітря разом з пилом та дрібними частинками кукурудзиння надійшло у фільтр димососом створюється розрядження. Відпрацьоване повітря після системи рециркуляції знову використовується як агент сушіння в барабані. З циклону кукурудзиння транспортером шнекового типу транспортується до загального бункера-змішувача буферного, звідки транспортером (шнековим)

подається на повторне подрібнення в дробарку молоткового типу МР-37 продуктивністю до 1,0 т/год. Якщо після попереднього подрібнення розміри частинок кукурудзиння склали 5...25 мм, то після молоткової дробарки розмір частинок має бути довжиною до 4 мм і діаметром до 1,5 мм. Кукурудзиння після дробарки візуально має нагадувати борошно, однорідне за консистенцією. Під час двоетапного фільтрування виконуються дві операції – виокремлення крупної фракції від дрібної та виокремлення повітря з кукурудзиння дрібного помелу (борошна). Для керування операцією сушіння та повторного подрібнення кукурудзиння використовуються відповідні пульти керування [38]. Основне призначення бункера-змішувача буферного забезпечити вологість помелу з кукурудзиння в межах 8–12%. Це необхідно для заданого стандартом рівня склеювання частинок кукурудзиння в пелеті.

3. Секція виготовлення пелети: Сировина на виробництво пелети надходить транспортером з бункера-змішувача. Пелети формуються під час проходження під високим тиском смоли через матрицю прес-пелетярні. Температура в робочій зоні формується з використанням парогенератора і складає (230...380°C). За таких умов лігнін набуває рідкого стану і склеює частинки кукурудзиння в пелету, яка має циліндричну форму діаметром 10 мм і довжиною 30 мм. Розміру 30 мм по довжині пелета набуває при використанні ножа. Ніж є нерухомим і зрізає напівпродукт, подібний до вермішелі, у розмір.

4. Секція отримання кінцевого продукту (пелет товарних). Пелети для набуття товарного вигляду потрібно охолодити, оскільки при виході із робочої зони їх температура становить біля 450°C. Якщо їх в такому вигляді запакувати, то по мірі охолодження в упаковці виділятиметься конденсат і створюватиме сприятливе середовище для грибків та мікроорганізмів, також порушиться міцність пелет, вони стануть більш крихкими. Для надання гранулам температури навколишнього середовища використовується охолоджувач, оснащений охолоджувальною колоною з продувкою повітрям. Сміття, гаряче повітря, волога, невикористані у формуванні пелет частинки кукурудзиння вентилятором подається у фільтр. Повітря після рециркуляції повторно використовується для технологічних потреб, а помелене кукурудзиння

спрямовується до змішувача. Після охолодження пелети набувають товарного вигляду. Вони мають гладку блискуча поверхню, правильну геометричну форму, вологість до 10%, твердість і їх температура не перевищує 60...80°C. Для подальшого фасування пелети з бункеру готової продукції подаються на ваги і після зважування фасуються в мішки вагою (100, 50, 25, 10 кг). За потреби перед надходженням до замовника мішки повторно зважуються.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Аналіз властивостей біомаси свідчить, що для досягнення високої ефективності газифікації слід забезпечити, щоб її паливні характеристики були в таких межах: вологість – до 20%; розмір частинок 25×25 мм для подрібненої сировини; зольність – до 12%; вміст сірки з хлором – до 1%. Чим вища теплота згорання біомаси, тим більш висококалорійним буде вироблений газ.

2. Аналіз впливу режимних параметрів процесу газифікації на ефективність виробництва газу з біомаси свідчить що для виробництва якісного газу потрібно, щоб температура в зоні окислювально-відновлювальних реакцій була 950–1500°C, тиск не перевищував 1,5 атмосфери, кількість газів дуття та їх швидкість були узгоджені з паливними властивостями біомаси та параметрами газогенератора, зокрема конвертера. Встановлено, що в якості агарної сировини доцільно використовувати кукурудзиння, оскільки даний вид сировини має високі паливні характеристики, є широко розповсюдженим та доступним.

3. Представлено удосконалений технологічний процес виробництва пелет з кукурудзиння з використанням комплексу пелетування біомаси КПББ-3. Зазначено, що використання попередньо підготовленого (пелетованого) кукурудзиння через високу насипну щільність та високі якісні характеристики забезпечить виробництво якісного горючого газу з високим вмістом CO та H₂.

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз технологій виробництва генераторного газу з біомаси

Технології виробництва генераторного газу залежать від типу газифікованої сировини та кінцевого призначення виробленого газу. Залежно від призначення виробленого газу газогенераторні установки стаціонарного типу поділяються на:

- установки з виробництва силового газу;
- установки з виробництва газу для опалювальних потреб;
- установки з виробництва газу для генерації електроенергії.

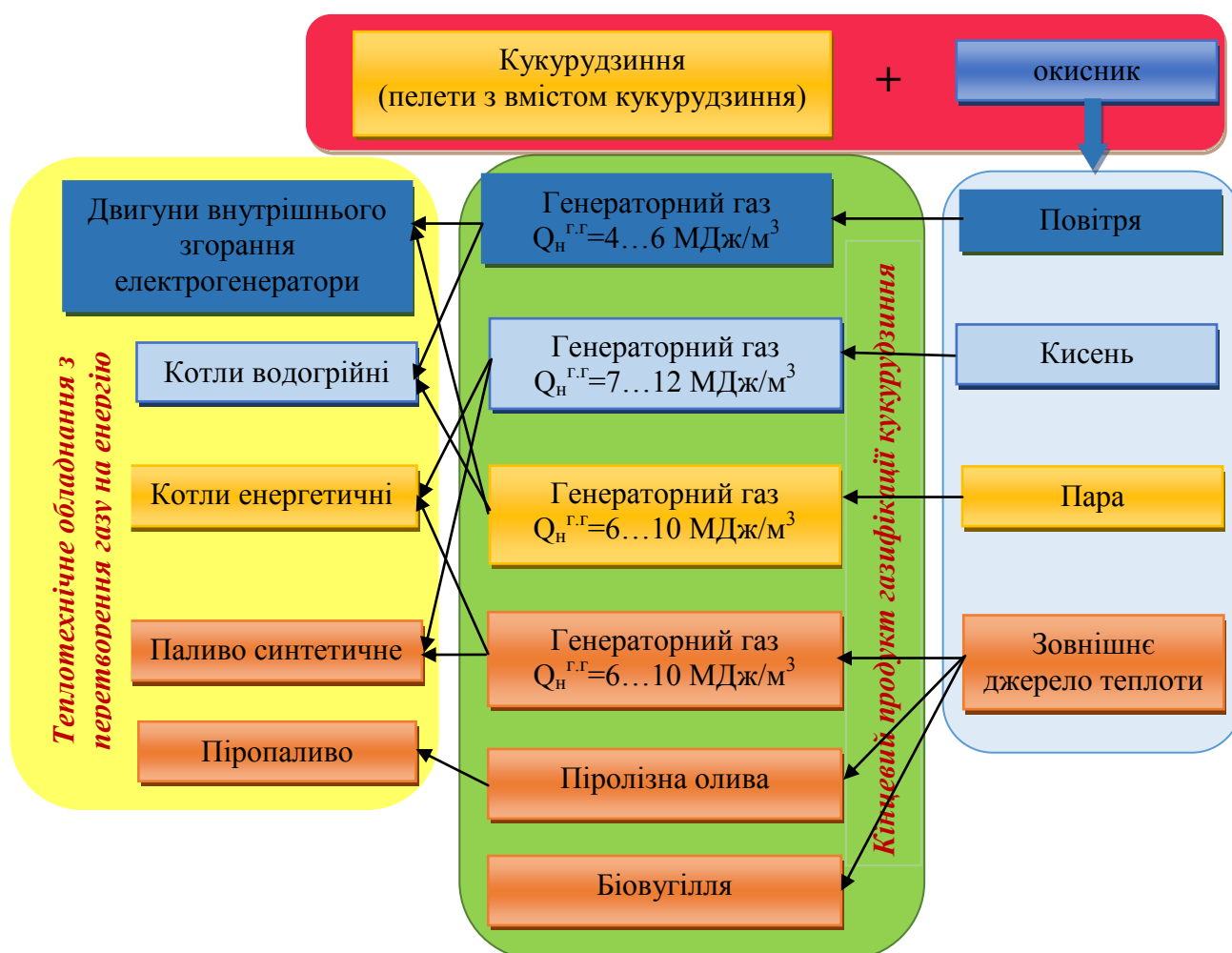


Рис. 2.1. Класифікація методів газифікації біомаси, розроблена на основі

[40]

Незалежно від кінцевого призначення газу типовий технологічний процес виробництва генераторного газу з біомаси включає такі етапи [40]:

1. Попередня підготовка рослинної біомаси до завантаження в бункер газогенератора.
2. Завантаження біомаси.
3. Подача окисника (кисень, повітря, водяна пара, газ з вмістом O_2) в реакційну зону.
4. Газифікація біомаси.
5. Охолодження та очищення виробленого газу.

Розглянемо найбільш поширені схеми технологічних процесів виробництва генераторного газу з рослинної біомаси.

На рис. 2.2. представлені загальний вигляд та технологічна схема виробництва генераторного газу з сумішевого палива (бруски деревини та солом'яні пелети), розроблену в НУБіП України під керівництвом професора Голуба Г.А. [41].

В схемі рис. 2.2 в якості палива для виробництва генераторного газу використовується суміш із деревинних брусочків зі стороною 40 мм та солом'яних пелет. Пелети мають бути виготовлені у відповідності до DIN 51731, а вологість деревини не перевищувати 30%. Якщо вологість деревних брусків є вищою ніж потрібно, в технологічну схему виробництва газу можна включити дробарку та сушильний барабан. Також установка може працювати виключно на деревних чи солом'яних пелетах, або на деревній трісці. Також в схему можна додати транспортер (шнековий) для безперебійного завантаження біомаси в бункер газогенератора. Також, при умові верхнього завантаження біомаси в якості завантажувачів використовують перепускний клапан, шлюзовий затвор, напівавтомат та оперативний склад.

Для запуску газогенератора використовується електричне розпалювання. Подача повітря в реакційну зону здійснюється через фурмовий пояс повітродувкою 2 (примусова подача), яка включається в розетку 4 (0,4 кВ) через частотний перетворювач 3. Швидкість подачі повітря в газогенератор вимірюється анемометром 1. Кількість повітря на процес газифікації

розраховується виходячи з фракції біомаси, її паливних характеристик, розмірів вузлів газогенератора та заданої продуктивності за газом.

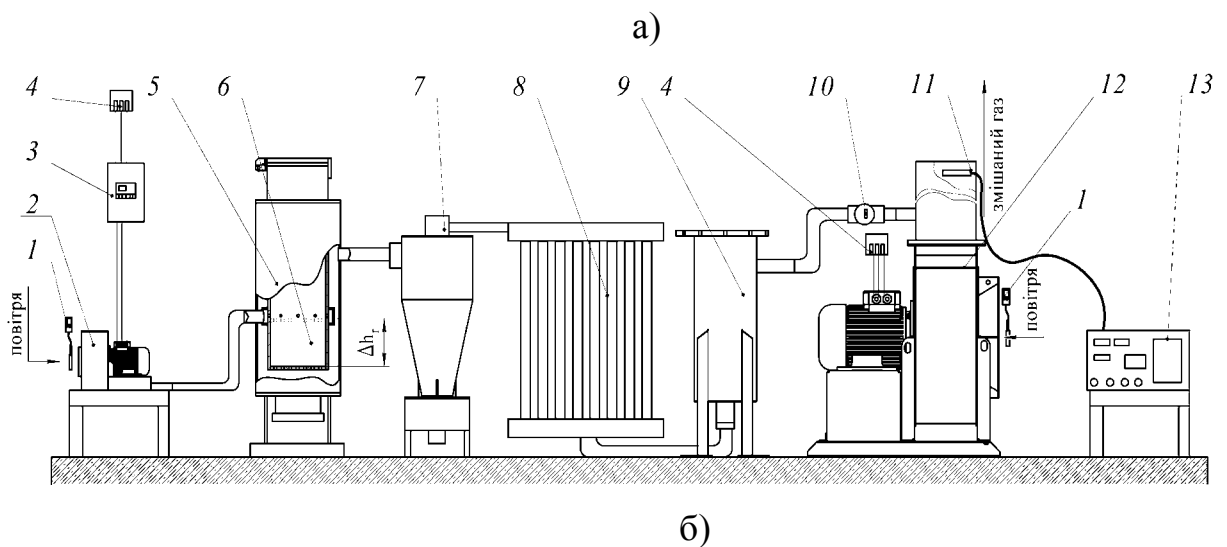


Рис. 2.2. Загальний вигляд та технологічна схема виробництва генераторного газу з сумішевого палива (солом'яні пелети з деревними брусками) [41]: а) загальний вигляд; б) технологічна схема: 13 – газоаналізатор; 12 – змішувач; 11 – датчик вуглекислого газу; 10 – лічильник газу роторний; 9 – фільтр тонкого очищення; 8 – охолоджувач (скруббер); 7 – фільтр грубого очищення; 6 – конвертер окислювально-відновлювальний; 5 – протипотоковий газогенератор; 4 – розетка 0,4 кВ; 3 – перетворювач частотний; 2 – повітродувка; 1 – анемометр.

Вироблений генераторний газ спрямовується до фільтра грубого очищення 7 (циклон), де очищується від механічних домішок (частки розміром до 5 мм) і частково охолоджується, оскільки при виході з газогенератора він має температуру 500...600°C.

Після попереднього очищення від крупних механічних домішок газ надходить до водяного охолоджувача 8 (скрубера) де, окрім охолодження, газ очищується від смол та розчинних у воді хімічних домішок. Скрубер умовно можна поділити на блок подачі води (використовують циркуляційний насос) та блок обробки води. В скрубери рух води та генераторного газу є зустрічним. Зустрічний потік води видаляє з газу сажу, окисли важких металів тощо. Відпрацьована вода зі скрубера надходить на очищенні і знову бере участь в технологічному процесі. Після скрубера температура газу становить 30–20°C. Для очищення від дрібнодисперсних механічних частинок та від домішок у вигляді складних хімічних сполук технологічна схема містить фільтр тонкого очищення 9. Фільтр також використовується для видалення залишкової вологи з генераторного газу. Для реєстрації кількості виробленого газу використовується роторний лічильник газу 10. Для контролю якості газу в схему включено датчик вмісту в газі окису вуглецю 11. Для більш точного аналізу складу газу застосовується газоаналізатор. Для формування паливної суміші, яка подаватиметься на електрогенератор чи опалювальний пристрій в схему включено змішувач газу з повітрям. Якщо потрібно накопичувати газ і одночасно вирівнювати його склад, то в схему можна включити ресивер.

Технологічна схема роботи газогенераторної установки (рис. 2.2) може працювати у газовому та газодизельному режимах. Газодизельному режимі газогенераторна установка реалізовує дві паралельні схеми керування – за дизельним паливом та за газом.

Технологічна схема виробництва електроенергії з генераторного газу з аграрної біомаси наведена на рис. 2.3 (розроблена в НУБіП України під керівництвом професора Голуба Г.А. [42]).

На відміну від технологічної схеми виробництва генераторного газу, наведеної на рис. 2.2, на рис. 2.3. представлена схема газогенераторної

установки для виробництва електроенергії містить теплообмінник, для можливості ведення паро-повітряної газифікації рослинних решток аграрного виробництва. Також в схемі наведено електростанцію для виробництва електроенергії та регулятор навантаження, для того щоб встановити потужність станції на генераторному газу з різних видів біомаси. Завдяки паро-повітряній газифікації установка виробляє генераторний газ високої якості, який може, за мінімальної підготовки, надходити в електрогенератор. Також схема на рис. 2.3 містить ресивер для накопичення та вирівнювання складу газу.

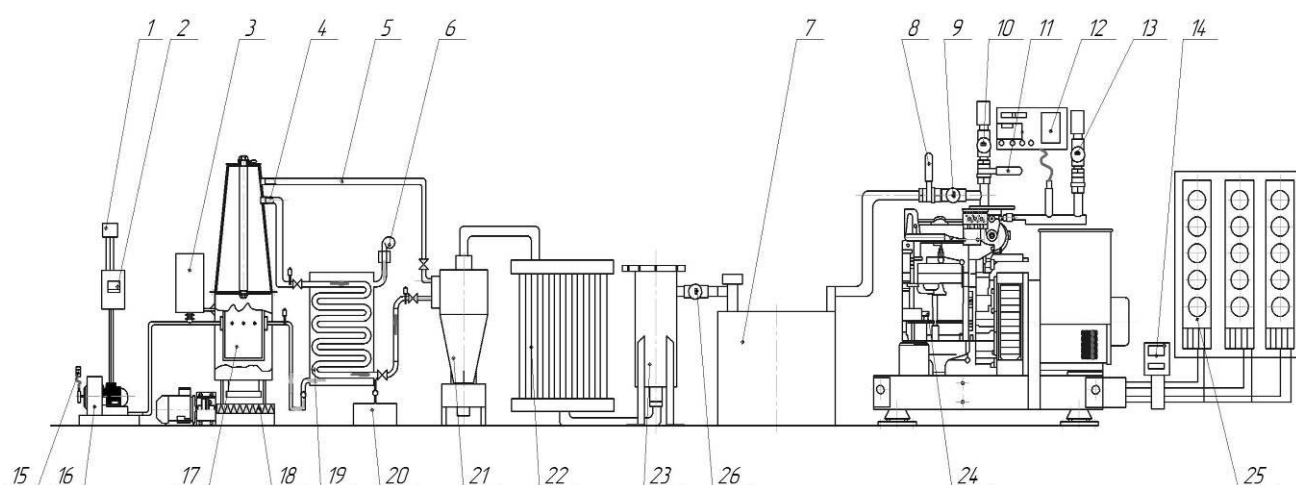


Рис. 2.3. Схема газогенераторної установки для виробництва електроенергії [42]: 26 – лічильник газу; 25 – регулятор навантаження електростанції; 24 – електростанція; 23 – фільтр тонкого очищення; 22 – скруббер; 21 – фільтр грубого очищення; 20 – ємність для конденсату; 19 – теплообмінник; 18 – транспортер золи; 17 – газогенератор; 16 – повітродувка; 15 – анемометр; 14 – вимірювач параметрів споживання струму; 13 – лічильник відпрацьованих газів; 12 – аналізатор газу; 11 – регулятор подачі повітря; 10 – лічильник повітря; 9 – лічильник газу; 8 – регулятор подачі газу; 7 – ресивер з випускним клапаном; 6 – повітродувка; 4, 5 – трубопровід; 3 – ємність з водою; 2 – перетворювач частоти; 1 – джерело струму.

Продуктивність установок за виробленим генераторним газом, наведених на рис 2.2. та 2.3. складає 80 та 110 м³/год. Зразки більш потужних

газогенераторних установок на аграрній біомасі, які функціонують на аграрних підприємствах наведені на рис. 2.4 – 2.6.

На рис. 2.4 наведено газогенераторну установку, що працює на соломі зернових, газ з якої призначений для опалювання приміщень ферми та 10 домогосподарств, а також є паливом для двигунів. В установці рис. 2.4 солома може завантажуватися як у вигляді січки, так і у вигляді пелети. Для безперервної подачі аграрної біомаси в бункер газогенератора в установці є транспортер (шнековий). Для роботи установки потрібно подавати палива 75...110 кг/год. Перед використанням генераторний газ, примусово відібраний з системи, також проходить обов'язкове очищення і охолодження.



Рис. 2.4. Загальний вигляд заводу та схема технологічного процесу виробництва генераторного газу з аграрної біомаси вологістю до 30% з протипотоковим газогенератором потужністю 200 кВт (КНР) [43]

Перевагою даної схеми є те, що в ній задіяний шести-секційний охолоджувач, наповнений металевою сіткою із можливістю постійної циркуляції води. Газ, проходячи через завитки сітки у зустрічному потоці холодної води інтенсивніше, ніж у попередніх схемах очищується і охолоджується до температури 45°C. Для повторного використання води передбачено рециркуляцію. Газифікація ведеться в температурному режимі 850 – 950°C. Для зберігання і вирівнювання хімічного складу газу є газгольдер.

Подібним чином влаштована технологічна схема виробництва генераторного газу з кукурудзиння вологістю до 40%, тепловою потужністю 300 кВт, виробництва КНР (рис. 2.5) [44].

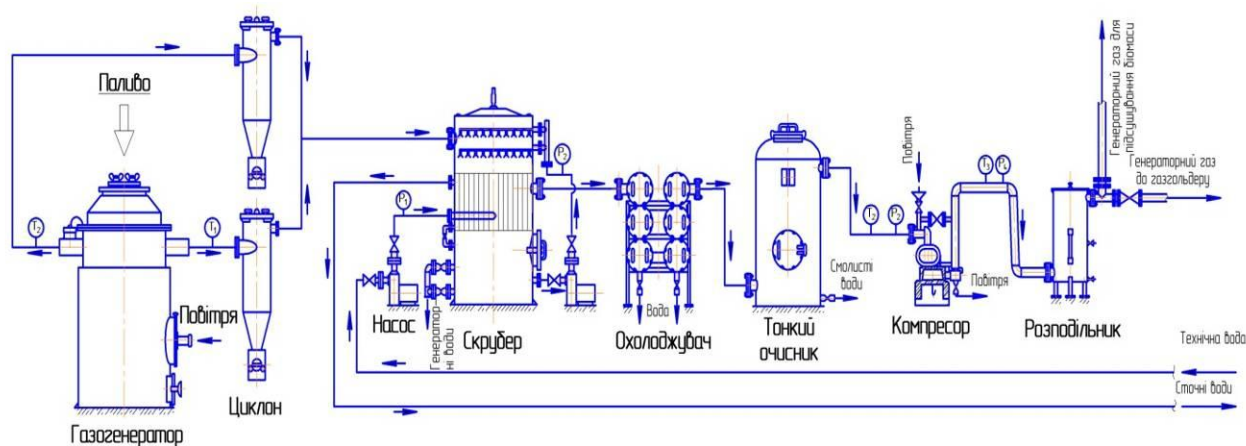


Рис. 2.5. Технологічна схема виробництва генераторного газу з кукурудзиння вологістю до 40%, тепловою потужністю 300 кВт, країна-виробник КНР [44]

Перевагою цієї технологічної схеми (рис. 2.5) є наявність автоматизованої системи управління процесами подачі палива, видалення золи, регулювання

температурного режиму в реакційній зоні. Наявність автоматизованої системи управління дозволила підвищити ККД установки з 68 до 87%. Витрати кукурудзиння на процес виробництва газу складають 120...155 кг/год залежно від вологості сировини. Перед використанням кукурудзиння обов'язково подрібнюють до розмірів 40×40 мм, що полегшує їх автоматичне завантаження в бункер газогенератора. Подрібнене кукурудзиння зберігається в спеціальному окремому гарно провітрюваному приміщенні-сховищі, щоб запобігти його псуванню. З приміщення-сховища сировина транспортером подається в бункер газогенератора. Також, на відміну від попередніх схем, в схемі рис. 2.5 задіяний прямо-потоківий газогенератор. Як і в попередніх варіантах газ перед використанням проходить через систему очищення і охолодження. Якщо оснастити установку газгольдерами, то в опалювальний сезон, завдяки можливості безперебійної роботи котлів на газу, що надходить з газгольдерів, можна досягти 25% економії на паливі. Запас генераторного газу в газгольдері забезпечує 2,5–3 дні безперебійної роботи котла.

Також стабільна робота теплотехнічного обладнання (газогенератора, котла), мінімізація їх роботи на перехідних режимах, подовжує їх термін роботи.

2.2. Розробка технологічної схеми виробництва генераторного газу з кукурудзиння

В якості прототипу технологічної схеми виробництва генераторного газу з кукурудзиння обрано схему розташування усіх одиниць обладнання газогенераторної установки на візку, на зразок, представленої в роботі [49].

Удосконалена схема компактної мобільної газогенераторної установки для газифікації кукурудзиння вологістю до 30% (пелет з кукурудзи) представлена на рис. 2.6. Установка є гарним варіантом для фермерських господарств. Всі агрегати установки монтуються на візку 3. Основним агрегатом є протипотоковий газогенератор 1. Вироблений силовий газ є паливом для ДВЗ. Перед надходженням до двигуна газ проходить через циклон

2, скруббер 6 та охолоджувач газу 4, в яких осідають механічні домішки, недоспалений вуглець та складні вуглеводневі сполуки (смоли). Така установка може комплектуватися додатковим обладнанням, наприклад насосом, і качати воду, або виконувати інші види робіт.

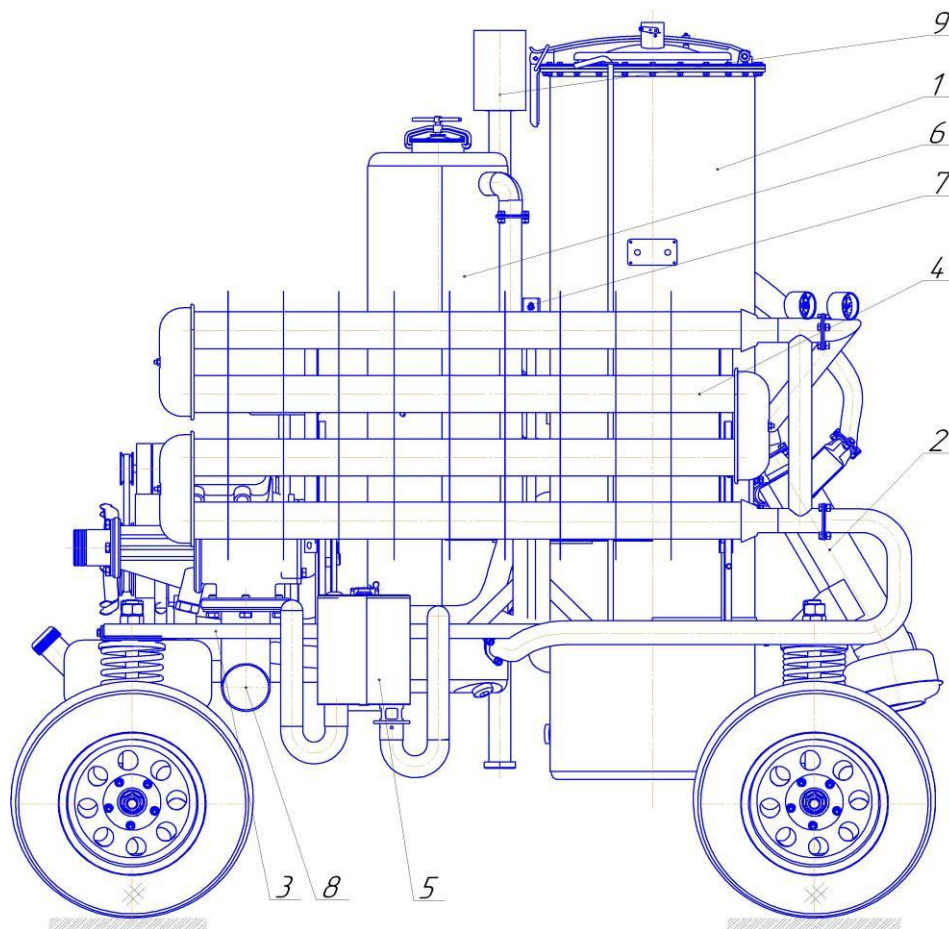


Рис. 2.6. Схема мобільної газогенераторної установки: 9 – пристрій для розпалювання біомаси; 8 – насос; 7 – ДВЗ; 6 – скруббер; 5 – підігрівач двигуна; 4 – охолоджувач газу; 3 – візок; 2 – циклон; 1 – газогенератор

Технічні характеристики мобільної газогенераторної установки (ГУ), які вона матиме після удосконалення (рис. 2.6):

- питома витрата кукурудзиння вологістю 20 % – 1,75 кг/кВт·год; 40 % – 3,2 кг/кВт·год;
- питома витрата пелет з кукурудзиння – 1,46 кг/кВт·год;
- обсяг об'ємного виробництва газу теплотворною здатністю 10 МДж/м³ – 110 м³/год;
- силова потужність мобільної ГУ – 75 кВт;
- теплова потужність мобільної ГУ – 127 кВт;

- коефіцієнт корисної дії процесу хіміко-термічної конверсії кукурудзиння в газ складає 90%.

Варіанти удосконалення полягатимуть в оснащенні ГУ (рис. 2.6) додатковим навісним обладнанням (рис. 2.7).

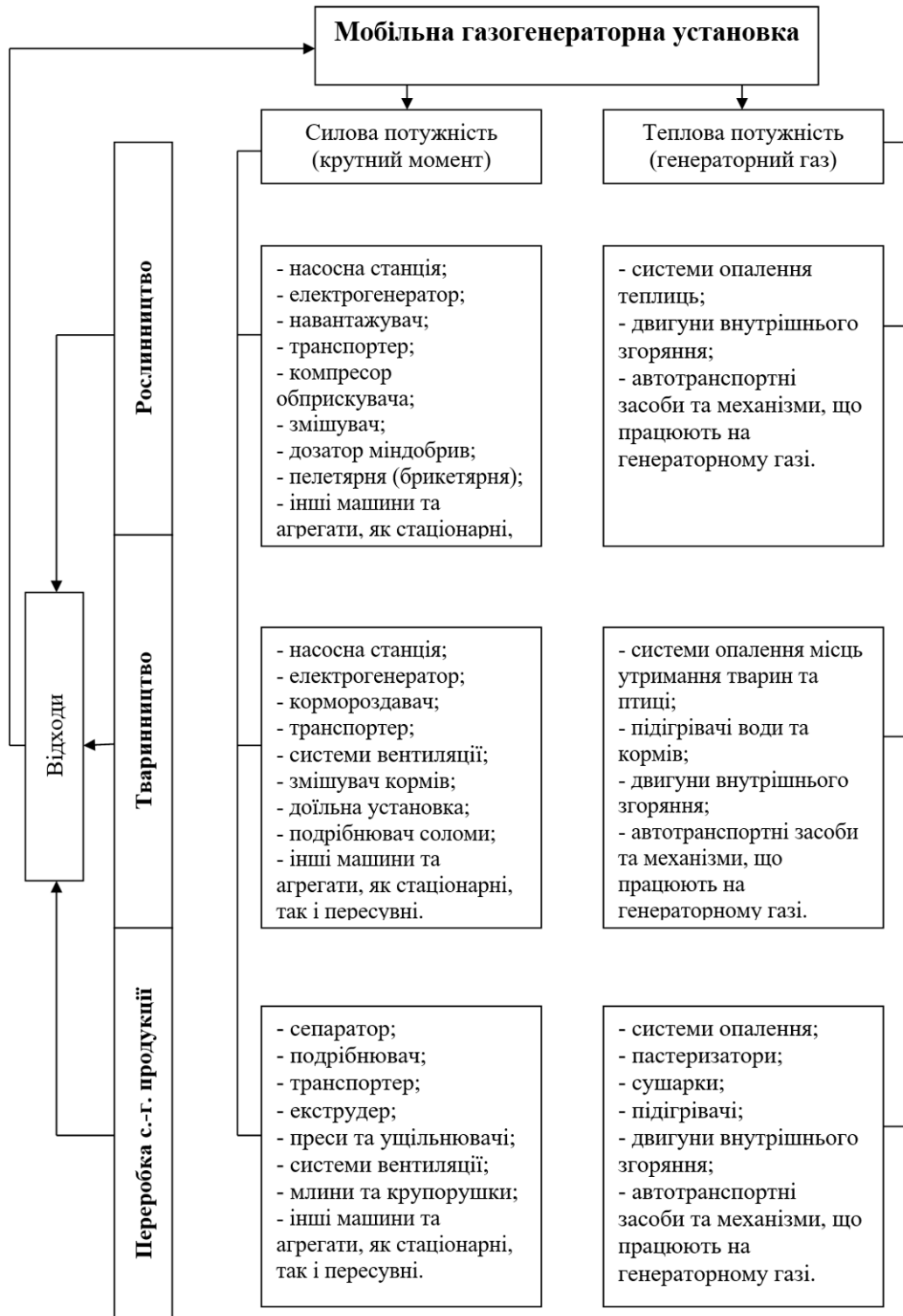


Рис. 2.7. Варіанти оснащення компактної мобільної газогенераторної установки

Для реалізації оснащення установки навісним обладнанням запропоновано підвищити її потужність до 75 кВт шляхом удосконалення конструкції газогенератора.

Також установка на сезонні роботи може встановлюватися безпосередньо на полях. Установка може працювати як стаціонарна при відповідному демонтажі з візка 3, так і транспортного типу – при встановленні на транспортному засобі.

Недоліком є те, що для обслуговування установки потрібен нагляд оператора, а також установка потребує постійної наявності сировини, оскільки розмір бункера розрахований на три години роботи газогенератора.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз технологій виробництва генераторного газу з біомаси. Встановлено, що в умовах малих фермерських господарств найкраще використовувати мобільну газогенераторну установку, яка є простої конструкції, легка в монтажі, при експлуатації та дозволяє виконувати кілька технологічних операцій (полив, приведення в робочий стан пилорами тощо).

2. Подальша модернізація установки рис. 2.6 полягатиме в можливості її оснащення більшою кількістю різного навісного обладнання, для чого пропонується удосконалити конструкцію протипотокового газогенератора цієї установки та при удосконаленні передбачити збільшення його потужності.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Сучасні умови виробництва потребують створення новітніх конструкцій газогенераторних установок, які вирізняються високим коефіцієнтом корисної дії (85...92 %), ефективністю переробки палива у висококалорійний газ, багатопаливністю ін. Для підтримання режимних параметрів на належному рівні новітні газогенератори оснащені системами автоматичного контролю робочих режимів, процесів завантаження палива та усунення попелу з робочої зони, мають високоефективні окислювально-відновлювані конвертери та системи підготовки (фільтри, скрубери) виробленого газу до подальшого спалювання в теплотехнічному обладнанні (ДВЗ, котли, генератори струму ін).

Вимоги, яким повинна відповідати сучасна конструкція газогенератора:

- багатопаливність (після відповідного переналагодження в газогенераторі стає можливим газифікувати різні види деревної та рослинної біомаси, або сумішевих композицій з зазначених видів сировини);
- здатність термічно розкладати вологу сировину (W сягає до 30 %);
- мати коефіцієнт корисної дії близько 92 % (з кілограму кукурудзиння повинно вироблятися не менше 3 м³ газу);
- теплота згорання генераторного газу в установках суцільного шару має бути 10–15 МДж/м³.

Вимоги, яким повинен відповідати конвертер:

- конструкція газо-дутьової секції окислювально-відновлюваного конвертора має рівномірно розподіляти окисник в шарі палива, що термічно розкладається;
- термін служби окислювально-відновлюваного конвертера повинен складати мінімум 110 тис. год;
- конструкція має бути технологічною та вирізнятися високою надійністю її складових елементів;

- температура в горловині конвертера при газифікації кукурудзиння (пелет з кукурудзи) має бути не меншою за 1000 – 1200 °С.

При розробці конструкції газогенератора та його складових одиниць потрібно враховувати вимоги щодо техніки безпеки при експлуатації цього типу теплотехнічного обладнання.

3.1. Аналіз конструкцій газогенераторів та вибір прототипу

На рис. 3.1 представлено класифікацію газогенераторів.

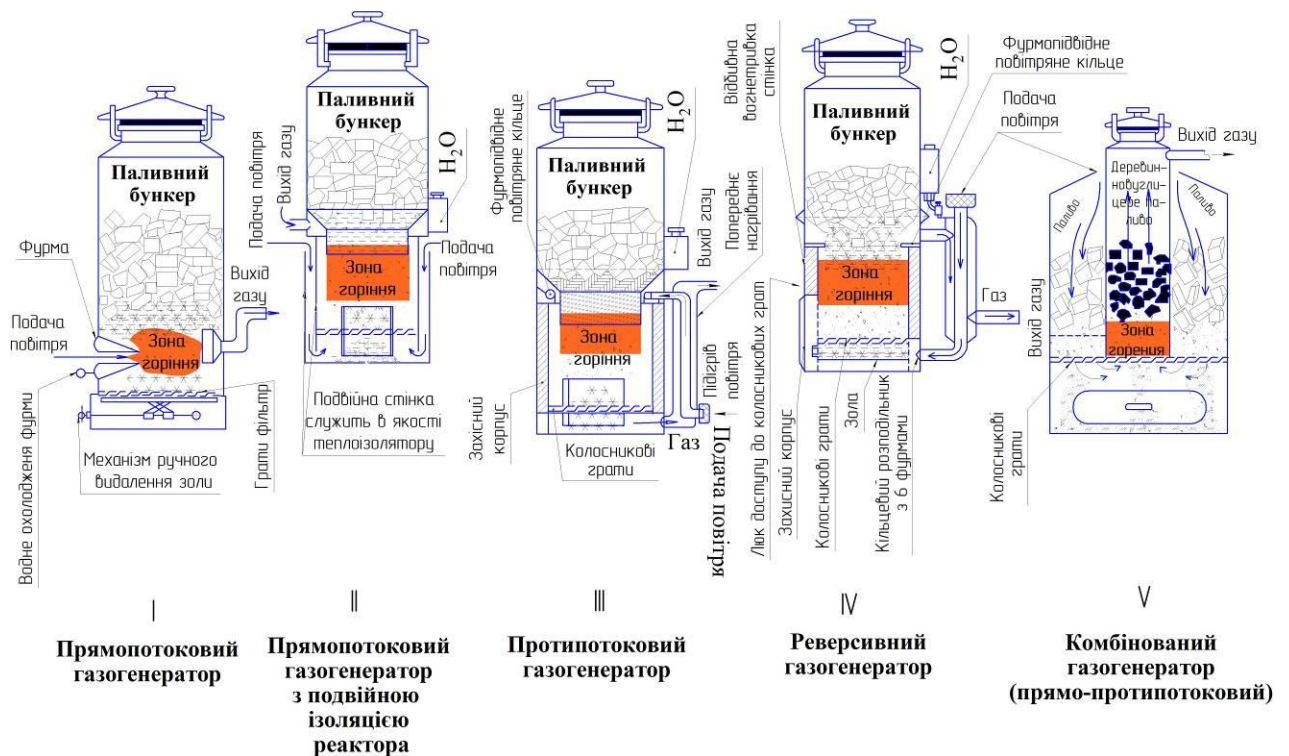


Рис. 3.1 Класифікація газогенераторів [45]

Газогенератори за процесом газифікації (характером руху потоку повітря і газового потоку) поділяються на: прямопотокові, протипотокові, перехреснопотокові та двозонні (комбіновані). Схеми цих газогенераторів наведені в додатку Б, рис.1. Залежно від того, які процеси протікають в шарі біомаси під час її термічного розкладання, виділяють наступні зони в газогенераторі: сушіння, піролізу, окислення і відновлення [45].

Зона сушіння паливного матеріалу характеризується температурним режимом 90 – 300 °С. Зона сушіння знаходиться у верхній частині бункера газогенератора. Біомаса надходить з вологістю до 40% і висихає до повної втрати вологості. Підсушування здійснюється генераторним газом, який піднімається від колосників у верхню частину бункера газогенератора, звідки через патрубок відбирається (примусово чи самопоотоком) [45].

Зона піролізу – це зона, в якій без дії повітря відбувається розкладання висушеної біомаси на леткі сполуки та вугільний залишок. Коли, при досягненні 100 °С, в шарі біомаси уся волога випарується, температура шару почне різко зростати поки не досягне температури інтенсивного розкладання (270–290 °С). Така температура (290 – 900 °С) є достатньою для утворення складних вуглеводневих сполук (C_nH_m , смол, метану, спиртів), проте занижкою для процесів окислення і відновлення, які протікають при температурі 900 – 1500 °С, в результаті яких утворюються основні горючі компоненти: окис та двоокис вуглецю та водень [45].

Активна зона складається з зони окислення і зони відновлення.

Зона окислення займає меншу частину висоти активної зони. Окисник надходить безпосередньо в зону окислення і повністю в ній витрачається на окислення невеликої кількості палива. З часом, при сталому надходженні окисника, усе паливо зони окислення встигає з ним прореагувати, утворивши велику кількість двоокису вуглецю. Вміст двоокису вуглецю має найвищу концентрацію в середині зони і до кінця цієї зони рівномірно спадає до мінімальних значень. Температура піднімається до 1200–1500 °С коли вуглець починає горіти, при цьому утворюючи велику кількість теплоти [45].

Зона відновлення характеризується тим, що температура знижується до 900 – 1100 °С, оскільки на реакцію відновлення вуглецю потрібно багато теплоти. Також в цій зоні розкладається водяна пара, тому якщо є задача отримати водяний газ, то пару слід подавати саме в цю зону. Умови зони відновлення сприяють зростанню концентрації окису вуглецю за рахунок зменшення концентрації двоокису вуглецю під час проходження газу крізь шар розпеченого біовугілля. Вміст окисника в зоні відновлення мінімальний [45].

Провівши аналіз газогенераторів за типом процесу газифікації та відповідне розташування в цих газогенераторах реакційних зон для подальшого удосконалення як прототип виберемо газогенератор протипотоковий (рис. 3.2).

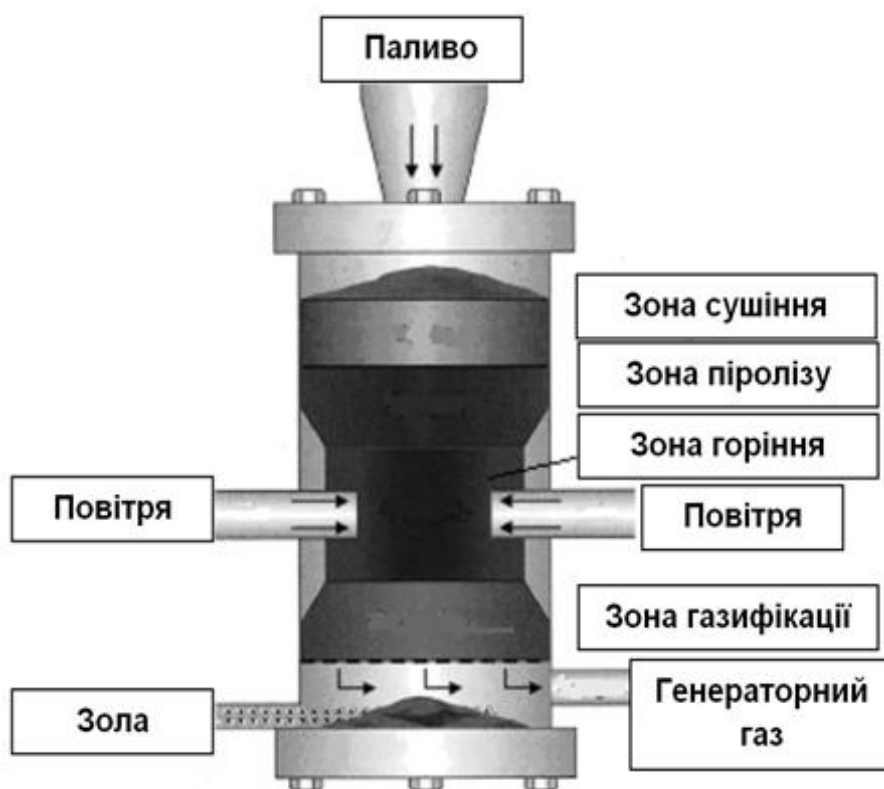


Рис. 3.2. Протипотоковий газогенератор із зазначенням реакційних зон [45]

Протипотоковий газогенератор, порівняно з іншими типами газогенераторів, має високий ККД процесу газифікації при відносно простому конструкційному оформленні. Специфічне розташування зон дозволяє виробляти високоякісний газ з мінімальним вмістом домішок при газифікації таких складних палив як кукурудзиння. Протипотоковий газогенератор може газифікувати кукурудзиння вологістю до 40% і зольністю до 12%. Вміст смол у виробленому газі не перевищує $0,02 \text{ г/нм}^3$, в той час як в газогенераторі прямого процесу газифікації вміст смол сягає $30\text{--}150 \text{ г/нм}^3$. Даний тип газогенератора є мало чутливим до змін навантаження. При повітряному процесі газифікації в протипотоковому газогенераторі можна отримати газ з нижчою теплотою згорання $5\text{--}7 \text{ МДЖ/м}^3$. Через високі показники розкладання складних вуглеводнів безпосередньо в газогенераторі, знижується потреба в подальшому багатоетапному очищенні газу, завдяки чому можна скоротити

кількість одиниць фільтрів та охолоджувачів газу. Це, додатково дозволяє збільшити відстань транспортування газу через зменшення одиниць обладнання, яке чинить опір проходженню газу. Недоліком протипотокового газогенератора є складна конструкція окислювально-відновлювального конвертера (реактора), колосникової решітки тощо. Надійним методом підвищення ефективності процесу виробництва газу є розробка/удосконалення основного вузла газогенератора – окислювально-відновлювального конвертера.

3.2. Вибір прототипу окислювально-відновлювального конвертера та розробка методики його розрахунку

Окислювально-відновлюваний конвертер є основним вузлом газогенератора, в якому протікають окислювано-відновлювані реакції процесу. Аналіз конструкцій окислювально-відновлювальних конвертерів наведено в таблиці 1 додатку В. Провівши аналіз окислювальних конвертерів (таблиця 1 додатку В) газогенераторів стаціонарного та транспортного типів в якості прототипу для подальшої модернізації виберемо конвертер, наведений на рис. 3.3. Цей конвертер був спроектований та тривалий час експлуатувався на тракторі ХТЗ-Т2Г [46].

Зазначений на рис. 3.3 конвертер виготовлений відливкою в піщану форму. В якості матеріалу для виготовлення стінок конвертера використано вуглецеву сталь Ст10. Перевагами конструкції рис. 3.3 є технологічність, простота виготовлення і експлуатації, помірна вартість. Попри переваги конструкція рис. 3.3 має недоліки, які потрібно усунути. Одним з них є низький термін служби, який складає близько тисячі годин роботи через прогорання в найбільш напруженій частині конструкції – горловині (звуженій частині між двома конусами – прямим і оберненим). Також в процесі газифікації, ще на етапі процесу піролізу утворюються водні розчини мурашиної та оцтової кислот, які є причиною хіміко-термічної корозії матеріалу, з якого виготовлено конвертер (Ст10). Конструкція конвертера 3.3 не дає можливості керувати

процесом газифікації, тому її удосконалення в напрямку можливості автоматизації процесу газифікації підвищить ефективність виробництва газу.

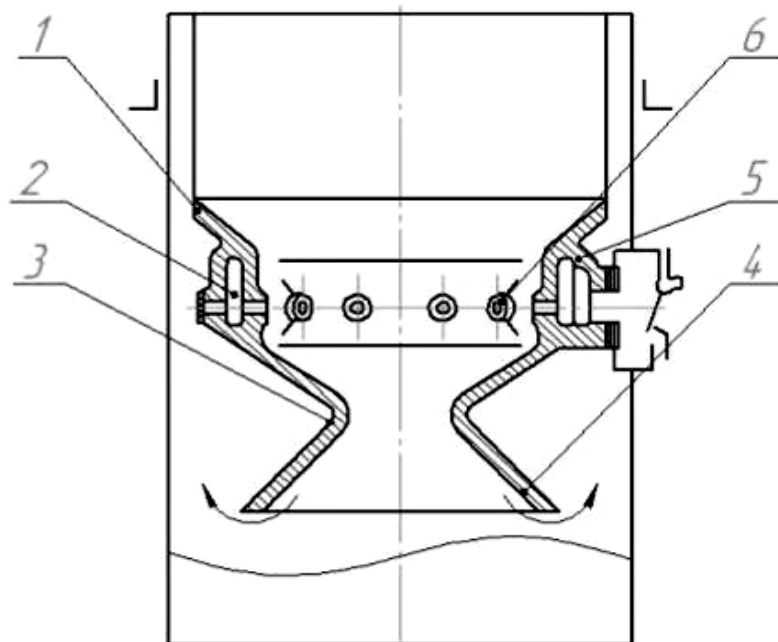


Рис. 3.3. Конвертер окислювально-відновлюваний [46]: 1 – верхня секція конвертера; 2 – газо-дутьтова секція; 3 – звужувальна горловина; 4 – нижня секція конвертера; 5 – патрубок; 6 – отвори для підведення газів дуття

Одним з напрямків удосконалення є використання сучасних матеріалів, а саме легованих сталей або кераміки. Оскільки керамічні вироби є чутливими до вібрацій, а планується мобільна газогенераторна установка на пересувному візку, то для вказаного призначення краще обрати жароміцну леговану сталь, стійку до роботи при високих температурах. Вибираємо для стінок конвертера жароміцну високолеговану сталь S63005. Склад сталі S63005 (Cr – 12...14%; P – до 0,03%; S – до 0,025%; Ni – 6...7,5%; Mn – до 0.8%; Si – 2...3%; C – 0,25...0,34%) [47]. Також планується розробити конструкцію повітря-розподільної коробки для попереднього підігрівання окисника (повітря) перед його надходженням в окислювально-відновлюваний конвертер.

Представимо методику розрахунку газогенератора та його основних вузлів на основі рівнянь [48]:

Для реалізації хіміко-термічних процесів в газогенераторі потрібно до палива підвести окисник. Витрати окисника, враховуючи, що вміст азоту в кукурудзинні незначний і ним можна знехтувати, становлять:

$$Q_{об.окис.} = \frac{Q_{об.газ} \cdot Азот_{газ}}{0,79} . \quad (3.1)$$

Об'ємне виробництво газу (м³/год) газогенератором є основним параметром для визначення розмірів та складових одиниць основних вузлів газогенераторної установки.

Знаючи обсяг об'ємного виробництва газу (м³/год) $Q_{об.газ}$ можна поррахувати витрати кукурудзиння $Q_{кукурудз}$ на виробництво 1 м³ газу, кг/год [48]:

$$Q_{кукурудз} = \frac{Q_{об.газ}}{n_{сух.г.г.}} . \quad (3.2)$$

Розрахуємо геометричні розміри газогенератора.

Площа газо-дугтьової секції конвертера, м² [48]:

$$S_{г-д.секції} = \frac{Q_H^{кукур.} \cdot Q_{кукурудз}}{J} k_{пов-роз.кор.} . \quad (3.3)$$

За рівнянням Г.А. Голуба [48]:

$$Q_H^{кукур.} = 16,311 - 0,1901 \cdot W . \quad (3.4)$$

Діаметр газо-дугтьової секції окислювально-відновлюваного конвертера [48], м:

$$D_{г-д.секції} = 1,14 \sqrt{D_{окисл.реакт.}} . \quad (3.5)$$

Діаметр горловини окислювально-відновлюваного конвертера [48], м:

$$d_{г.о.р.} \approx 0,47 \cdot D_{г-д.секції} . \quad (3.6)$$

Розташування дугтьових отворів має забезпечувати температуру в найвужчій частині окислювально-відновлюваного конвертера (горловині) 1000 – 1200 °С.

Висота від газо-дугтьової секції до горловини [48]:

$$h_{г-д.секції} = 0,42 \cdot D_{г-д.секції} . \quad (3.7)$$

Висота реакційного шару кукурудзиння [48]:

$$H_{\text{кукуруд}} = 0,68 \cdot D_{\text{г-д.секції}} = h_{\text{зорл}} + h_{\text{верх.секція}} . \quad (3.8)$$

Висота $h_{\text{верх.секції}}$ верхньої секції окислювально-відновлюваного конвертера, м:

$$h_{\text{верх.секції}} = 0,68 \cdot D_{\text{г-д.секції}} - h_{\text{зорл}} . \quad (3.9)$$

Щоб безперешкодно видаляти золу з колосників висота $h_{\text{к.р-н.с.к.}}$ від колосників до нижньої секції конвертера має складати понад 60 мм.

Щоб шар кукурудзиння вдосталь насичить киснем і реалізувати належне протікання окислювально-відновлюваних реакцій в газо-дутьовій секції рекомендується розробити периферійний спосіб подачі окисника. Це можна зробити шляхом виготовлення по периметру газо-дутьової секції окислювально-відновлюваного конвертера отворів, в які можна монтувати фурми змінного геометричного перерізу, кількість яких рівна:

$$m = \frac{\pi \cdot D_{\text{г-д.секції}}}{P_{\phi}} . \quad (3.10)$$

За [48] рекомендований діапазон для P_{ϕ} становить 0,1–0,16 м.

Діаметр отворів для підведення окисника в газо-дутьову секцію [48]:

$$d_{\text{отв}} = 19,02 \sqrt{\frac{Q_{\text{об.окис}}}{m \cdot v_{\text{окис}} \cdot \psi_{\text{отвір}}}} . \quad (3.11)$$

Об'єм бункера $V_{\text{б.г.г.}}$, м³ [48]:

$$V_{\text{б.г.г.}} = Q_{\text{кукур}} \cdot \frac{\gamma}{\rho_{\text{кукур}}} . \quad (3.12)$$

Для забезпечення стабільності процесу газифікації кукурудзиння об'єм бункера газогенератора, отриманий за рівнянням 3.12, потрібно помножити на коефіцієнт запасу бункера ($k_{\text{запас}}=1,2\dots 1,3$). Це дозволить уникнути повного вигорання кукурудзиння і повної зупинки установки.

В прототипі газогенераторної установки період завантаження бункера кукурудзинням складав 2,5–3 години. Така періодичність завантаження забезпечувала достатньо кукурудзиння для виробництва газу та дозволила не вийти при проектуванні за допустимі габарити як бункера, так і всього

газогенератора. Надлишок кукурудзиння потребуватиме додаткового підведення теплоти, щоб його підсушити. В іншому випадку усі етапи протікання газифікаційного процесу будуть порушені, що може супроводжуватися підвищенням тиску, зниженням температури в реакційних зонах та призвести до зупинки газогенератора.

Верхня секція окислювально-відновлюваного конвертера з'єднується з газо-дутьовою секцією. Вона має форму зворотного конуса з кутом $95-120^{\circ}$. Це забезпечує плавне сходження кукурудзиння (пелет з кукурудзи) і усуває явище зависання пелет (кукурудзиння). Кут переміщення кукурудзиння по твірній верхньої секції конвертера має бути $47-60^{\circ}$.

Об'єм бункера для попелу $V_{\text{бункер-попіл}}$, м^3 :

$$V_{\text{бункер-попіл}} = \frac{Q_{\text{кукур}} \cdot A \cdot \gamma_{\text{попіл}}}{100 \cdot \rho_{\text{попіл}}} \quad (3.13)$$

Бункер для попелу не лише його накопичує, але й забезпечує потрібний температурний режим в шарі попелу (близько 500°C). Висота шару попелу повинна займати третину відстані від днища бункера до окислювально-відновлюваного конвертера газогенератора. Температура попелу повинна бути достатньою для стабілізації хімічного складу газу і занадто високою для протікання реакцій зі зменшення вмісту CO і збільшення вмісту CO_2 .

Висота бункера для попелу $h_{\text{бункер-попіл}}$, м :

$$h_{\text{бункер-попіл}} = 1,27 \cdot \frac{V_{\text{бункер-попіл}}}{D_{\text{к.г.}}^2} \quad (3.14)$$

Раціональні пропорції основних вузлів газогенератора забезпечують оптимальний режим газифікації і підвищують якісний та кількісний склад газу.

Методика розрахунку колосникової решітки.

Для розрахунку параметрів колосникової решітки розробимо методику розрахунку на основі рівнянь, наведених в роботі [50].

Коефіцієнт, який описує форму решітки γ за [50] становить 0,51.

Розрахунок живого перерізу (просвіту) решітки виконаємо за рівнянням:

$$S_{жив.перет.} = \frac{\sum S_{зазор.}}{S_{перез.}} = \frac{1 - (n_{полич} \cdot n_{колос}^{-1})}{1 + (m_{колос} \cdot \lambda_{колос}^{-1})}. \quad (3.15)$$

Діаметр решітки (гідравлічний) визначається за наступним рівнянням:

$$d = \frac{4 \sum S_{зазор.}}{P_{отв.}} = \frac{4 \cdot (n_{колос} - n_{полич}) \lambda_{колос}}{2[(n_{колос} - n_{полич}) + \lambda_{колос}]} \approx 2 \lambda_{колос} \quad (3.16)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору нерухомої колосникової решітки знайдемо за наступним рівнянням:

$$\zeta''_{колос} = (\zeta + h_{колос} \cdot \chi \cdot d^{-1}) S_{жив.перет.}^{-1} \quad (3.17)$$

$$\zeta' = \gamma \cdot \zeta''_{колос} \quad (3.18)$$

Опір частини решітки з зазорами знаходиться за рівнянням:

$$\Delta p_{колос} = 0,5 \cdot \zeta' \cdot v_{газ}^2 \cdot \rho_{газ} \cdot d^{-1} \frac{t_{колос}}{t_{отв}} \frac{P_{отв}}{P_{колос}} \quad (3.19)$$

3.3. Розрахунок конструкційно-технологічних параметрів газогенератора

Розрахунок конструкційно-технологічних параметрів газогенератора виконуємо за методикою, наведеною в пункті 3.2 та роботі [51]. Розрахунки виконуємо виходячи з елементарного складу кукурудзиння, з якого виробляємо газ. Зазначимо елементарний склад кукурудзиння: вуглець – 45,5 %; водень – 5,5 %; азот – 0,69 %; кисень – 41,5 %; сірка – 0,04 %; хлор – 0,2 %. Нижча теплота згорання сухої частини – 17 МДж/кг, температура плавлення золи – 1050...1200°C. Дані для розрахунку параметрів газогенератора, наведені в таблиці 3.1.

Виходячи з розрахунків за методикою [51] отримуємо наступний склад сухого генераторного газу з кукурудзиння: метан – 3,8%; азот – 37,85%; двоокис вуглецю – 14,97%; водень – 25,67%; окис вуглецю – 17,71%.

Вхідні дані для розрахунку параметрів газогенератора

| Параметр | Позначення | Числове значення | Розмірність | Посилання |
|--|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|
| Фізичні властивості окисника | | | | |
| Густина | $\rho_{\text{окисн}}$ | 1,2047 | кг·м ⁻³ | [51] |
| Тиск | $p_{\text{окисн}}$ | 0,105 | МПа | [51] |
| Температура | $T_{\text{окисн}}$ | 20 | °С | [51] |
| Вологовміст | d_0 | 0,012 | кг/кг | [51] |
| Фізичні властивості пари водяної | | | | |
| Питома теплоємність пари | c_n | 2,2 (за сталого тиску) | кДж·(кг·К) ⁻¹ | [51] |
| Питома енергія утворення пари | r_n | 2260 (за сталого тиску) | кДж·кг ⁻¹ | [51] |
| Хімічний склад, зольність, вологість та теплотворна здатність кукурудзиння | | | | |
| Нижча теплота згорання сухої частини | Q_n^p | 17,0 | МДж/кг | формула 3.6 |
| Склад сухої частини кукурудзиння | C^p | 45,5 | % | [51, 52] |
| | S^p | 0,11 | % | [51, 52] |
| | H^p | 5,86 | % | [51, 52] |
| | N^p | 0,52 | % | [51, 52] |
| | O^p | 44,43 | % | [51, 52] |
| Зольність | A^p | % | 8,0 | [51, 52] |
| Вологість | W^p | % | до 30 | [51, 52] |
| Насипна щільність кукурудзиння | $\rho_{\text{кукур}}$ | 174±6 | кг/м ³ | [50] |

З одного кілограму кукурудзиння вологістю до 30% виробляється, в середньому, 3 кубометри сухого генераторного газу густиною 0,997 кг/м³ та теплоємністю 1,42 кДж/(м³·°С), який матиме вищу теплотворну здатність рівну $Q_B^z = 11,76$ МДж/м³. Температура, з якою відбирається газ з газогенератора і при якій зазначено вище вказані показники, становить 450 градусів.

Результати розрахунків витрат кукурудзиння та окисника на виробництво газу за методикою [51], вказано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок витрат кукурудзиння/пелет та окисника на виробництво газу

| Параметр | Позначення | Числове значення | Розмірність | Посилання |
|--|--------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Витрати кукурудзиння та окисника на виробництво генераторного газу | | | | |
| Об'ємні витрати окисника на виробництво газу (повітря) | $Q_{об.окис.}$ | 44 (39) | м ³ | п. 3.2, рівняння 3.1 |
| Витрати кукурудзиння вологістю до 30% (плет) | $Q_{кукурудз}$ | 37 (18) | кг/год | п. 3.2, рівняння 3.2 |
| На випаровування вологи витрачено теплоти | q | 418 (275) | кДж/кг | [52] |
| Об'ємне виробництво газу | $Q_{об.газ}$ | 110 | м ³ /год | п. 3.2, рівняння 3.1 |
| Кількість окисника, необхідна на горіння газу (повітря сухе) | $V_{об.сух.окис.}$ | 1,9 | кг/кг | [52] |

В таблиці 3.2 наведені теплотехнічні параметри процесу газифікації кукурудзиння. Зокрема, зазначено яку кількість окисника потрібно підвести в газогенератор для забезпечення протікання окислювально-відновлювальних реакцій, скільки складатимуть витрати кукурудзиння на виробництво 110 м³ газу за годину тощо. В роботі для проектування газогенератора обрано гірший варіант підготовки кукурудзиння – подрібнення сировини вологістю до 30%. Забезпечивши ефективну газифікацію кукурудзиння в такому вигляді можемо бути впевнені у високій ефективності газифікації пелет з кукурудзиння. На основі розрахунку витрат кукурудзиння та окисника на виробництво газу визначимо конструкційно-технологічні параметри конвертера (таблиця 3.3).

Результати розрахунку конструкційно-технологічних параметрів
окислювально-відновлювального конвертера

| Параметр | Позначення | Числове значення | Розмірність | Посилання |
|---|-------------------|---------------------|----------------|-----------------------|
| Результати розрахунків параметрів конвертера | | | | |
| Швидкість підведення окисника | $v_{окис}$ | 22 | м/с | [51] |
| Діаметр отворів для підведення окисника в газо-дутьову секцію | $d_{отв}$ | 0,01 | м | п. 3.2, рівняння 3.11 |
| Крок з яким висвердлені отвори | $p_{ф}$ | 0,2 | м | п. 3.2 |
| Кількість дутьових отворів, в які можна монтувати фурми змінного геометричного перерізу | m | 5 | шт | п. 3.2, рівняння 3.10 |
| Діаметр газо-дутьової секції окислювально-відновлюваного конвертера | $D_{г-д.секції}$ | $32 \cdot 10^{-2}$ | м | п. 3.2, рівняння 3.5 |
| Площа поперечного перерізу газо-дутьової секції окислювально-відновлюваного конвертера | $S_{г-д.секції}$ | $1 \cdot 10^{-2}$ | м ² | п. 3.2 |
| Висота верхньої секції конвертера | $h_{верх.секції}$ | $96 \cdot 10^{-3}$ | м | п. 3.2, рівняння 3.9 |
| Висота від газо-дутьової секції до горловини | $h_{г-д.секції}$ | $118 \cdot 10^{-3}$ | м | п. 3.2, рівняння 3.7 |
| Площа горловини | $S_{г.о.р.}$ | $18 \cdot 10^{-3}$ | м ² | п. 3.2 |
| Діаметр горловини окислювально-відновлюваного конвертера | $d_{г.о.р.}$ | $14 \cdot 10^{-2}$ | м | п. 3.2, рівняння 3.6 |
| Відстань між основою нижньої секції конвертера та решіткою колосниковою | $H_{к-к.р.}$ | $72 \cdot 10^{-3}$ | м | [51] |

Результати розрахунку конструкційно-технологічних параметрів
газогенератора

| Параметр | Позначення | Числове значення | Розмірність | Посилання |
|--|---------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| Насипна щільність та кількість попелу, утвореного при газифікації кукурудзиння | | | | |
| Утворена кількість відходів від газифікації кукурудзиння | ε | 8 | % | [50] |
| Насипна щільність попелу | $\rho_{\text{попіл}}$ | 211±4,92 | кг/м ³ | [50] |
| Результати розрахунків параметрів газогенератора | | | | |
| Діаметр корпусу | $D_{\text{к.г.}}$ | 5,4·10 ⁻³ | м | п. 3.2 |
| Висота бункера | $H_{\text{бункер}}$ | 1,678 | м | п. 3.2 |
| Об'єм бункера | $V_{\text{б.г.г.}}$ | 0,38 | м ³ | п. 3.2, рівняння 3.12 |
| Періодичність надходження кукурудзиння до бункеру | γ | 2,8 | год | [51] |
| Висота бункера для попелу | $h_{\text{бункер-попіл}}$ | 0,146 | м | п. 3.2, рівняння 3.14 |
| Об'єм бункера для попелу | $V_{\text{бункер-попіл}}$ | 0,046 | м ³ | п. 3.2, рівняння 3.13 |
| Періодичність чищення бункеру для попелу | $\gamma_{\text{попіл}}$ | 6 | год | [51] |

Після здійснення розрахунків виконано округлення деяких параметрів до стандартних значень за рекомендованими рядами стандартних значень. Зокрема, прийнято збільшити діаметр газо-дугтьової секції окислювально-відновлюваного конвертера з $32 \cdot 10^{-2}$ мм до $34 \cdot 10^{-2}$, що дозволить висвердлити п'ять дугтьових отворів зі стандартним кроком 0,2 м. Щоб на процес газифікації надходила достатня об'ємна кількість окисника при швидкості його підведення 22 м/с потрібно прийняти діаметр отворів для підведення окисника в газо-дугтьову секцію рівним 0,01 м.

При проектуванні окислювально-відновлювального конвектора, а також бункерів для кукурудзиння та для попелу враховано, що температура в реакційній зоні повинна бути в межах 900 – 1050°C. У частині газогенератора,

де встановлена колосникова решітка та в частині між віссю колосникової решітки та основою бункера для попелу усі зайві простори скорочено, щоб запобігти в зонах з температурою 450...550 градусів протіканню окислювальної реакції $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$. Збільшення вмісту двоокису вуглецю у виробленому газі погіршує його якість.

Результати розрахунків параметрів колосникової решітки

Коефіцієнт, який описує форму решітки за [50] становить 0,51.

Розрахунок живого перерізу (просвіту) решітки:

$$S_{\text{жив.перет.}} = \frac{1 - 0,081/0,36}{1 + 0,049/0,0064} = \frac{1 - 0,225}{1 + 7,656} = \frac{0,775}{8,656} = 0,0895 \text{ м}^2$$

Розрахунок діаметру решітки (гідравлічного):

$$d \approx 2\lambda_{\text{колос}} = 2 \cdot 0,0064 = 0,0128 \text{ м}$$

При $S_{\text{жив.перет.}} = 0,0895 \text{ м}^2$ коефіцієнт $\chi = 1,73$.

Коефіцієнт гідравлічного опору нерухомої колосникової решітки:

$$\zeta_{\text{колос}}'' = (1,73 + 0,028 \cdot 0,064 \cdot 0,0128^{-1}) / 0,0895 = 210$$

$$\zeta' = 0,51 \cdot 210 = 107,1$$

Опір частини решітки з зазорами:

$$\Delta p_{\text{колос}} = 107,1 \cdot 0,48^2 \cdot 1,1 \cdot 0,0256^{-1} \cdot \frac{1100}{298} \cdot \frac{10450}{9435} = 4,3 \text{ кгс / м}^2$$

3.4. Обґрунтування конструкції газогенератора

Газогенератор (рис. 3.4) є основним вузлом мобільної газогенераторної установки (рис. 2.6).

Газогенератор виготовлено зварюванням. Для виготовлення окислювально-відновлювального конвертера 1 та корпусу 2 використано циліндри з легованої конструкційної сталі діаметрами триста сорок та п'ятсот п'ятдесят чотири міліметри відповідно. В нижній частині корпусу змонтовано двосекційні колосники 7, одна секція з яких є нерухомою (штампівка зі сталі листової), а інша – рухомою (відливка з чавуну ковкого 65-45-12).

Це дозволяє ефективно, використовуючи рукоятку 8, прикріплену до валу з вихідним кінцем у вигляді квадрату 12×12 мм, змінювати положення рухомої секції колосників і просіювати попіл.

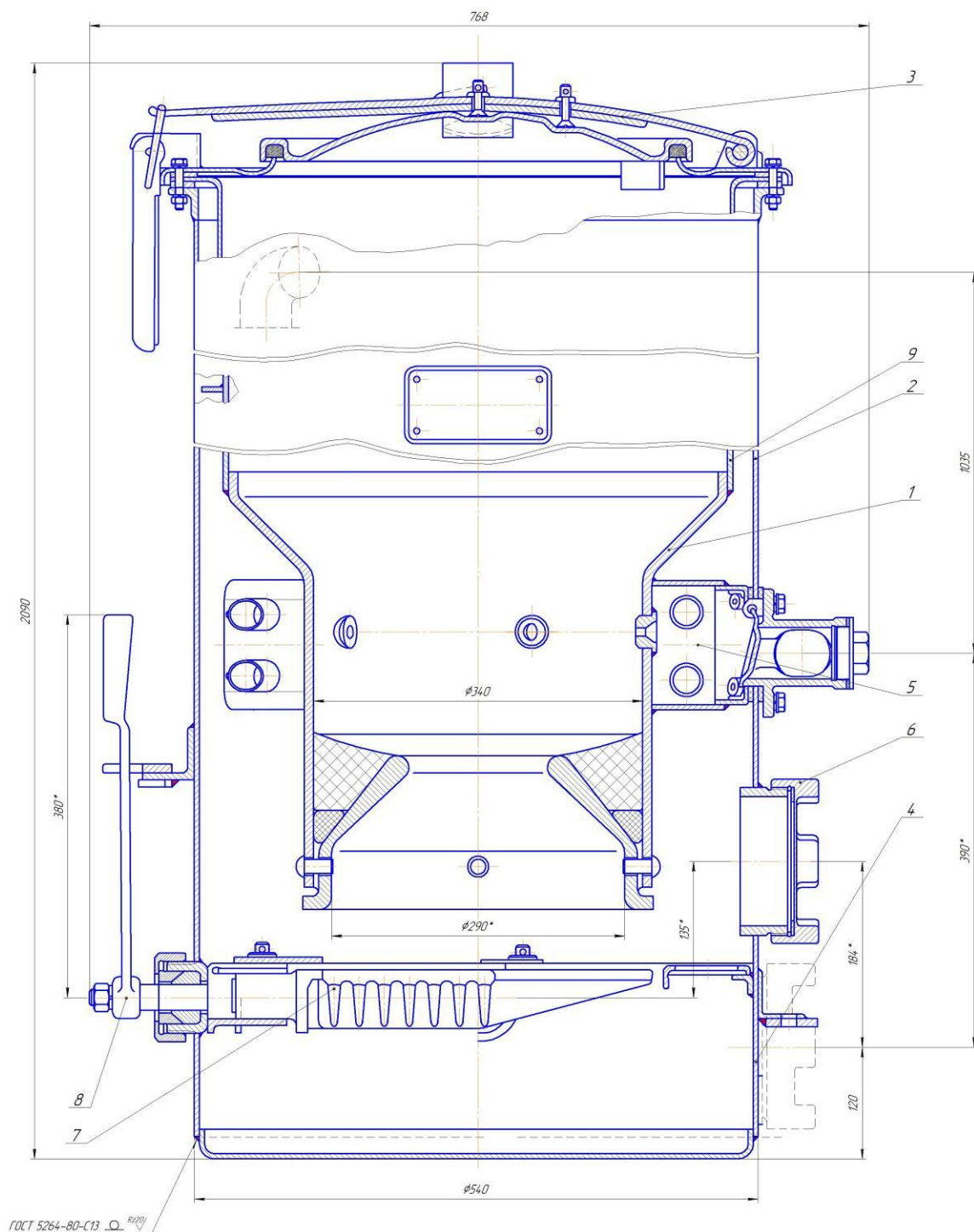


Рис. 3.4. Газогенератор: 1 – окислювально-відновлювальний конвертер; 2 – корпус; 3 – кришка; 4 – бункер для попелу; 5 – блок підігріву окисника; 6 – оглядове вікно (служить також для видалення попелу); 7 – колосники; 8 – рукоятка; 9 – бункер для кукурудзиння

Нерухома частина колосників кріпиться до корпусу (кріплення – кронштейни та кутки опорні). Кут повороту рухомої секції колосників обмежений фланцем-обмежувачем. Також нижня частина корпусу 2 з'єднана з бункером для попелу 4. У верхній частині корпусу 2 газогенератора кріпиться бункер для кукурудзиння 9, нижня частина якого приварена до верхньої секції конвертера 1. З метою продовження терміну служби окислювально-відновлювального конвертера, окрім заміни сталі Ст10 на сталь S63005, розроблено блок підігріву окисника 5. Вибраний за рис. 2.1 окисник, залежно від заданого кінцевого продукту, попередньо, до надходження в конвертер, нагрівається в блоці 5 і з температурою, на кілька градусів нижчою ніж в пристінковому просторі конвертера, надходить в робочу зону. Корпус газогенератора герметично закривається кришкою 3, яка додатково підресорена, оскільки газогенератор – це обладнання, що працює під тиском.

Для відбирання газу до корпусу газогенератора приварений відповідний патрубок. Газ може текти самовільно, або примусово відбиратися насосом. Також для забезпечення рівномірного відкачування газу і конструкції передбачено фланець відбивний.

В разі неможливості усунення з робочої зони газогенератора попелу механічним чи автоматичним методами через технічні неполадки в конструкції, є оглядове вікно 6, оснащене різьбовим фланцем, і призначене для видалення золи ручним способом з колосників. Азбестові ущільнювачі застосовують під фланець люка для герметичності з'єднання.

Якщо постає завдання автоматичним чи механічним способами подавати кукурудзиння в бункер, то кришку 3 можна замінити на герметичні жалюзі, які мають певний такт роботи і відкриваються за допомогою датчиків при надходженні свіжої порції кукурудзиння шнеками / транспортером.

Модернізована конструкція корпусу газогенератора представлена на рис. 3.5. Корпус газогенератора слугує для кріплення усіх вузлів газогенератора і має діаметр п'ятсот сорок сантиметрів. У верхній частині корпусу кріпиться бункер, діаметром чотириста дев'яносто вісім міліметрів, до нижньої частини якого кріпиться окислювально-відновлювальний конвертер. Оскільки до

корпусу не ставлять такі високі вимоги щодо надійної роботи при високих температурах, як до конвертера, то для його виготовлення можемо вибрати вуглецеву сталь за ДСТУ 7809-2004 (листову). Обираємо сталь 45 ($C=0,42\dots0,5$; $Mn=0,5\dots0,8$; $Si=0,17\dots0,37$; $Cu\leq 0,2$; $P\leq 0,035$; $S\leq 0,04$; $Ni\leq 0,3$; $Cr\leq 0,025$; відносне звуження $\psi=40\%$; відносне подовження $\delta_s=16\%$; тимчасовий опір $\sigma_{т.о.}=600 \text{ Н/мм}^2$; межа плинності $\sigma_{пл.}=355 \text{ Н/мм}^2$ [47].

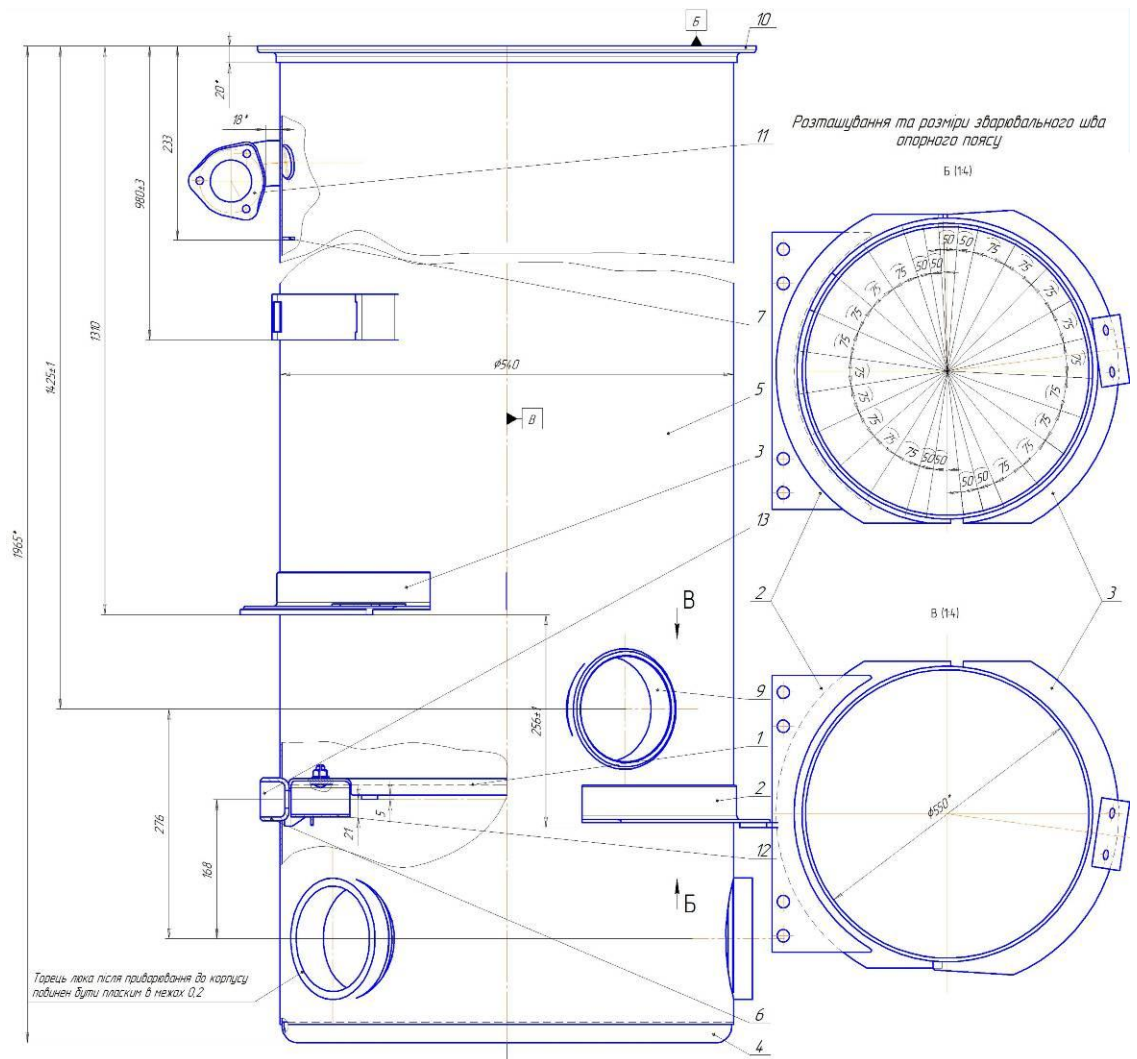


Рис. 3.5. Корпус газогенератора

В нижній частині корпусу, яка є бункером для попелу, виготовлено два отвори для монтажу люків. Один – для усунення попелу, інший – оглядове вікно. Над місцем кріплення колосникової решітки також виготовлено отвір для подальшого монтажу люка для видалення кукурудзиння, яке не прореагувало під час процесу газифікації і гальмує газифікаційний процес. Таке явище може мати місце при неправильному тепловому режимі газифікації, коли, наприклад,

температура є зависокою (понад 1100°C) і явище оплавлення золи переважає над протіканням окислювально-відновлювальних реакцій. Тоді зверху кукурудзиння (пелети) оплавляються, а всередині оплавленого агломерату знаходиться непрореаговане паливо. Саме для видалення таких агломератів і передбачено конструкційно отвір для люку. В центральній частині корпусу виготовлено пази для кріплення конвертора, оснащеного системою підведення окисника в зону горіння. У верхній частині корпусу приварені труба діаметром вісімнадцять міліметрів з фланцем для відбирання виробленого газу. Над конвертером також виготовлено прямокутний отвір для монтажу оглядового вікна. Перед монтажем люків та оглядових вікон навколо отворів виготовлено пази для закладання ущільнювачів.

В роботі вирішено розробити колосникову решітку. Оскільки рослинна сировина має різні паливні характеристики, а також температуру та хімічний склад золи, то у відомих конструкціях газогенераторів колосникову решітку проектують під кожний вид сировини, яка підлягає газифікації. Це вимагає витрат коштів, часу та є неефективним технічним прийомом. Тому доцільно розробити складну конструкцію колосникової решітки, яка дасть змогу безперебійно газифікувати будь-який вид біомаси та постійно видаляти золу з робочої зони. Колосникова решітка є двосекційною, одна секція є нерухомою (штамповка зі сталі), а інша – рухомою (відливка з чавуну ковкого 65-45-12).

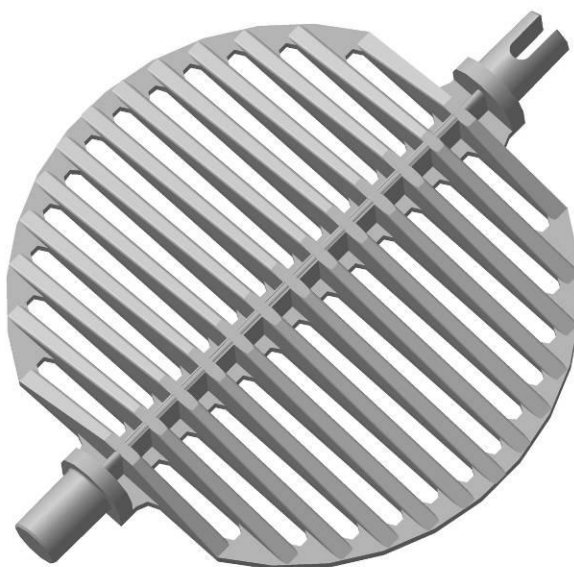


Рис. 3.6. Колосникова решітка (рухома частина)

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

4.1. Вимоги техніки безпеки, які висуваються до мобільної газогенераторної установки

Однією з базових вимог до тривалого використання мобільної газогенераторної установки є її правильна технічна експлуатація. Оскільки установка складається з кількох окремих агрегатів: газогенератора, циклона, скрубера, двигуна внутрішнього згорання з системою підігріву, то вимоги з техніки безпеки до установки будуть складатися з вимог техніки безпеки до кожного окремого агрегату. Це, в свою чергу дає розуміння про те, яким чином складати відповідні інструкції з експлуатації кожної з одиниць газогенераторної установки.

Підготовка модуля до використання

Перед введенням модуля в дію потрібно перевірити чи належний технічний стан мають усі його складові одиниці. Перед початком робіт кришку газогенератора потрібно відкрити і перевірити відсутність залишків неспаленого палива з попереднього його використання, газу, вологи тощо. Також перевіряється технічний стан та герметичність шлюзу, кришок люків, оглядових вікон, патрубків, вентилів засувки ін. Особливі вимоги ставляться до окислювально-відновлювального конвертера, а саме газо-дутьової секції (фурм, труб, коробок розподілу окисника). На поверхнях цих деталей повинні бути відсутніми тріщини, наслідки дії високотемпературної корозії.

Окремо перевіряється стан фільтрів та скрубера (гідравлічних затворів, вентилів, труб і насосів систем підведення і відведення води із зони охолодження газу).

Установка вводиться в роботу з моменту запуску газогенератора, який може тривати до 20-40 хвилин доки не вийде на стабільний режим роботи.

Оскільки установка є мобільною, мають місце часті порушення герметичності фланцевих з'єднань що перешкоджає розпалюванню та експлуатації газогенератора через просочування повітря в установку. Для запобігання зазначеного слід використовувати стійкі до дії високих температур та кислот (оцтової, мурашиної) сучасні ущільнювальні та прокладкові матеріали. Вихід з ладу труби відбирання газу через сажовий осад є причиною підвищеного опору як в газогенераторі, так і його складових одиницях, що який, досягши певних значень, може призвести до зупинки установки. Про справність зазначеної труби можна судити за показами манометрів водяного типу, а приводять трубу в робочий стан запалюванням (включають вентилятор).

Наступним кроком є перевірка бункера з паливом та системи завантаження палива. Не менш важливим етапом є перевірка надійності кріплення агрегатів модуля до платформи.

Завантаження газогенератора модуля кукурудзинням

Процес завантаження палива в газогенератор може різнитися залежно від того як довго газогенератор не експлуатувався. Якщо газогенератор тривалий час був заповнений паливом і знаходився в неробочому стані, то 2/3 такого палива краще вивантажити і заповнити газогенератор сухим паливом. Якщо газогенератор був тривалий час порожнім, то він заповнюється сухим паливом. Рівень палива на перше завантаження газогенератора має бути на 25 см вище рівня газо-дугтьових отворів з фурмами. Запуск газогенератора здійснюватиметься автоматичним розпалюванням палива, що міститься на колосниковій решітці, іскрою системи запалювання ДВЗ. Для сприяння стійкості горіння вентилятором розпалювання нагнітається окисник. Описаний процес триватиме доки шар кукурудзиння від решітки колосникової до газо-дугтьової секції не стане розпеченим і процес горіння не стане стійким. Далі газогенератор повністю довантажуюмо кукурудзинням і перевіряємо герметичність між кришкою бункера та бункером. Кожне наступне довантаження газогенератора здійснюється, коли рівень палива в ньому складає близько 1/3 від початкового рівня.

Через 20-40 хвилин роботи газогенератора, коли процес виробництва газу встановився, потрібно візуально проконтролювати якість газу: якісний газ з високим вмістом H_2 та CO має блакитне світіння з рожевим відтінком; газ низької якості має жовте забарвлення; газ з високим вмістом вологи та смол має нестійке полум'я з чорним димом.

При газифікації вологого палива, доки газогенератор не вийде на стабільний режим роботи (1,5...2 год), інші агрегати модуля слід відключити.

Робота газогенераторного модуля

Основні операції технологічного процесу газифікації кукурудзиння:

- механічне (або автоматичне) завантаження кукурудзиння в бункер газогенератора;

- періодичне струшування кукурудзиння (пелет) в газогенераторі з метою уникнення його зависання, або утворення зон з кукурудзинням, яке не задіяне в газифікації;

- контроль режимних параметрів процесу (тиску, температури в реактивних зонах);

- шляхом примусового відбирання газу створити розрідження в системі.

Існує два способи завантаження кукурудзиння в бункер газогенератора: безперервне та періодичне (один раз на годину).

Струшування газогенератора відбувається постійно при роботі модуля в мобільному режимі (усі агрегати газогенераторної установки закріплені на візку) під час його переміщення. При роботі газогенераторної установки в стаціонарному режимі струшування потрібно проводити періодично (раз на 30 хвилин) застосовуючи зовнішні джерела вібрації. Часті струшування газогенератора є причиною надмірного ущільнення паливного шару.

Температура в робочих зонах газогенератора повинна відповідати значенням, вказаним у п. 3.1. В бункері для попелу має знаходитись щільний шар біовугілля в розпеченому стані для підтримки температури, потрібної процесу відновлення. Температури в робочих зонах, як правило, контролюють термопарами. В патрубку для вилучення виробленого газу його температура має сягати 400–500°C. За інших умов, коли температура газу є поза межами

вказаного діапазону, можна свідчити про порушення перебігу газифікаційного процесу. Як правило, нижчі за норму температури в патрубку для вилучення виробленого газу свідчать про високу вологість палива, що спричиняє пониження температури в активній зоні конвертера. Вищі за норму температури в патрубку для вилучення виробленого газу свідчать про наявність прогарів та пустот в окислювально-відновлювальному конвертері. Також, задля запобігання явищу плавлення золи температуру робочих зон понижують додаючи до окисника присадку з пари.

Порушення режиму розрідження також має негативний вплив на процес газифікації, призводячи до зупинки усього процесу. Причиною є надлишок попелу в бункері для попелу, наявність в трубі для вилучення газу відкладення у вигляді сажі, вихід з ладу фільтрів та скрубера.

ТО-2 скрубера та фільтрів потрібно виконувати кожні 280...380 годин роботи.

Зупинка газогенератора та модуля

При зупинці газогенератора на деякий час (до доби) потрібно залишки газу спрямувати на факел та спалити їх. Надалі відкрити усі люки для вилучення залишків газу, припинити роботу насосів та гідравлічної системи охолодження скрубера, перекрити вентиль на змішувачі.

При консервації газогенератора на тривалий час потрібно його повністю очистити від залишків кукурудзиння, попелу, газу. Усі ущільнення перевірити на герметичність, змастити герметиками, вкласти в пази та щільно закрити люки, оглядові вікна, шлюзи тощо. При зупинці модуля потрібно злити воду системи охолодження, перевірити усі труби на наявність залишків конденсату та води. Також від механічних залишків та осаду очищується циклон. Усі з'єднання перевіряються на герметичність і агрегати модуля щільно закриваються на час перебування на консервації.

З метою правильної експлуатації та обслуговування модуля обслуговуючий персонал має пройти навчання. Також до модуля мають бути розроблені інструкції, доповнені ілюстративними матеріалами.

Рівень знань обслуговуючого персоналу щодо вимог ТБ та ОП, та знань інструкції перевіряється раз на півроку.

4.2. Вимоги пожежної безпеки до мобільної модульної установки

Основним нормативним документом, який регулює вимоги до пожежної безпеки є Закон України «Про пожежну безпеку», прийнятий ВР України 17 грудня 1993 року (№ 3745-ХІІ) та введений в дію 29 січня 1994 року згідно з Постановою Верховної Ради України від 17 грудня 1993 року № 3747-ХІІ [53]. Закон складається з 41 статті та включає наступні ключові аспекти: правову основу в галузі пожежної безпеки (ПБ); забезпечення ПБ; компетенції в галузі ПБ та їх забезпечення; права та обов'язки органів державного управління щодо забезпечення ПБ; відповідальність за порушення вимог ПБ.

Оскільки газогенераторна модульна мобільна установка відноситься до обладнання, що працює під тиском, до неї ставляться ті ж самі вимоги. Що й до обладнання, що працює під тиском (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Основні вимоги та нормативні документи щодо пожежної безпеки

| Назва розділу | Нормативні документи | Вимога |
|------------------------|---|--|
| Загальні положення | ДСН Б В.1.1-7-2002; НАПБ А.01.001-2004; ЗУ «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015 №124-VIII; ДСТУ 7034:2009 | Проектна документація на мобільну установку, погоджена в ДСНС; відповідність ЗУ «Про ТР та ОВ»; сертифікація обладнання. |
| Монтаж та встановлення | ДБН В.2.5-20:2017; ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010; ДСТУ Б В.1.1-30:2013 | Монтаж відповідно до ДБН (встановлення на негорючій основі); дотримання протипожежних відстаней; використання теплоізоляційних матеріалів; забезпечення вентиляції; дотримання заходів колективного та індивідуального захисту. |
| Експлуатація | Правила технічної експлуатації; Правила безпеки систем газопостачання, ДСанПіН 2.2.4-171-10 | Наявність графіку та своєчасне проведення ТО1, ТО2 та ремонтів; наявність справної автоматики, систем газо- та димовідведення; регулярне очищення від смол і золи, контроль температури, заборона експлуатації з несправностями. |
| Засоби пожежогасіння | НАПБ Б.03.001-2004, ДСТУ EN 3-7:2016 | Проведення навчань обслуговуючого персоналу з ТБ та ОП, стажування на робочому місці тощо; наявність вогнегасників та пожежної сигналізації |

Таблиця розроблена на основі джерела [53].

Виходячи з даних таблиці 4.1 розробимо таблицю 4.2 з вимогами щодо пожежної безпеки мобільної газогенераторної установки з розробкою систем захисту, посилаючись на нормативну документацію та технічні вимоги.

Таблиця 4.2

Заходи з пожежної безпеки при експлуатації газогенераторної установки

| Назва заходу | Практичні вимоги та рекомендації | Негативні наслідки недотримання вимог ПБ |
|---------------------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Протипожежне оснащення | На візку модуля з газогенераторною установкою передбачено наявність двох вогнегасників: вуглекислотного ВВ-5 та порошкового ВП-5. Кріпляться під візком в спеціальних нішах з метою віддалення від джерел тепла, проте передбачено легку доступність до вогнегасників | Пожежа, пошкодження обладнання, ураження персоналу. |
| Організаційні заходи | Розробка інструкцій щодо дій в НС. Розробка планів евакуації; дотримання СНіП 2.09.02-2017 щодо шляхів евакуації; відстань до виходу – згідно нормативів (при експлуатації модуля в приміщенні). Забезпечити персонал засобами індивідуального та колективного захисту | Підвищення ризику травмування в надзвичайних ситуаціях. Неможливість покинути приміщення через відсутність або несправність евакуаційних виходів. |
| Запуск газогенератора в роботу. | Здійснюється системою автоматичного розпалювання від іскри. Перевірити автоматику, справність паливної форсунки. При виході з ладу системи автоматичного розпалювання можна запустити газогенератор вручну. Тоді розпалювання потрібно здійснювати на відкритому повітрі та не перебувати поруч з факелом. | Опіки, неконтрольоване займання. |

| Назва заходу | Практичні вимоги та рекомендації | Негативні наслідки недотримання вимог ПБ |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Температурна впливи | Забезпечити теплоізоляцію корпус газогенератора та труби відведення газу та контролювати її герметичність, оскільки температура процесу газифікації складає 800–1100°C; перевірити герметичність з'єднань з метою усунення проривання полум'я та пари з газогенератора назовні. | Займання, вибух, деформація корпусних деталей, опіки персоналу. |
| Виключення джерел займання | Легкозаймісті речовини повинні бути поза модулем, перевіряти синхронність роботи газогенератора та ДВЗ. | Вибухи, займання, ураження. |
| Отруєння чадним газом | Контролювати герметичність місць потенційного витoku газу, запобігати вдиханню газу. Установка повинна експлуатуватися на відкритому повітря, або в ретельно провітрюваних приміщеннях. | Отруєння, втрата свідомості, летальний випадок. |
| Обслуговування та очищення агрегатів мобільної газогенераторної установки | Здійснюється при повністю виключеному та охолодженому газогенераторі, фільтрі, скрубери та ДВЗ. Газогенератор потрібно очистити від залишків кукурудзиння, попелу, газу, непрореагованого палива. Фільтр очищається від сміття, зі скрубера та системи охолодження зливається вода. Усі агрегати перевіряється на герметичність з'єднань стиснутим повітрям, очищаються – водою під тиском. Усі заходи проводяться в спеціальному приміщенні/місці. | Займання золи, невігорівшого палива, пожежа, опіки. |
| Термічне ураження та ураження вибухом | Впроваджувати автоматичне завантаження кукурудзиння в бункер. При ручному завантаженні заборонено нахилитися над люком бункера та заглядати всередину. Не можна використовувати відкритий вогонь для перевірки протікання газу зі стиків. | Раптові вибухи газу, сильні опіки. |

| Назва заходу | Практичні вимоги та рекомендації | Негативні наслідки недотримання вимог ПБ |
|---------------------------------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Зупинка модуля після роботи | Повна зупинка установки, перекриття повітропроводів. | Потрапляння газу у повітря, загроза вибуху чи отруєння. |
| Ремонт та обслуговування | Усі ремонтні роботи виконуються при повністю зупиненому та охолодженому газогенераторі, циклоні, скрубєрі, ДВЗ тощо. Труби, призначені для руху генераторного газу слід ретельно провітрити. | Поранення персоналу внаслідок вибуху залишкового газу. |
| Медична безпека | Наявність аптечки першої допомоги обов'язкова. | Відсутність можливості швидкої медичної реакції. |
| Системи забезпечення пожежної безпеки | Згідно з ДСТУ 8828:2019, об'єкт повинен бути оснащений: системою попередження пожеж, протипожежним захистом, організаційно-технічними заходами. Збір горючих речовин і газу здійснюється в металеві контейнери; використання піску. | Підвищена пожежна небезпека, порушення нормативних вимог. Нагромадження небезпечних речовин, займання. |

Дотримання правил пожежної безпеки за таблицею 4.2 забезпечить тривалу експлуатацію модуля та унеможливить травмування обслуговуючого установку персоналу.

4.3. Висновки до розділу 4

Розроблено заходи з техніки безпеки та пожежної безпеки при експлуатації мобільної газогенераторної установки модульного типу. Вказано основні ризики ураження при експлуатації установки та, відповідно до нормативної документації, розроблено заходи уникнення ураження.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Економічні розрахунки за проектом

Для підтвердження доцільності існування конструкції мобільної ГУ потрібно виконати її техніко-економічну оцінку. В проектуваній мобільній ГУ змінено конструкцію окислювально-відновлювального конвектора, колосникової решітки та корпусу газогенератора. Тому економічне порівняння виконаємо для двох мобільних ГУ (прототипу та проектуваної) за створеними вузлами без врахування витрат на створення ГУ, та супутніх витрат пов'язаних з монтажем та експлуатацією. Для економічних розрахунків скористаємося методикою [54].

Кошти, витрачені на розробку конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора:

$$F_{\text{модерн}} = DC_{\text{прям.витр.}} + K_{\text{н.в.}} \quad (5.1)$$

Прямі витрати на розробку конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора та їх виготовлення:

$$DC_{\text{прям.витр.}} = S + \sum TC + C_{\text{матер}} + C_{\text{част.занас.}} \quad (5.2)$$

Оплата праці виробників:

$$S_{\text{виробіток}} = 16,7 \cdot 10^{-3} \cdot J_{\text{н.ч.}} \cdot J_{\text{т.с.}} \quad (5.3)$$

Додаткові капітальні витрати на розробку конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора та їх виготовлення (табл. 5.1), є частиною розрахунків економічної ефективності з модернізації мобільної ГУ.

Оплата праці виробників з нарахуваннями:

$$S = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{ум(к)}} \cdot DC_{\text{посад.окл.}} \cdot \gamma \cdot (1 + SSC). \quad (5.4)$$

Амортизація (річний показник), грн:

$$A = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ум(к)}} \cdot B_{\text{обл.}} \cdot A_{\text{річн.}} / (\Phi \cdot \chi). \quad (5.5)$$

Таблиця 5.1.

Додаткові витрати на виготовлення конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора

| № | Витрати | Сума, тис. грн. |
|---|---|--------------------|
| 1 | Пошукові та науково-дослідні роботи | 9,6 |
| 2 | Матеріал та комплектуючі для модернізації конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора | 64,7 |
| 3 | Оплату праці за встановлення конвертера, колосникової решітки та корпусу газогенератора | 2,45 |
| 4 | Купівлю, доставку, налагодження до роботи модернізованих одиниць обладнання ГУ (25% від суми п. 2 таблиці 5.1) | 4,8 |
| 5 | Основних фондів, щодо експлуатації базового та модернізованого модуля, оснащеного ГУ (1,07 тис. грн. / рік – витрати на утримання 1м ² виробничої площі, загалом під ГУ – 3 м ²) | 3,21 |
| 6 | Заходи та засоби на ОП, ТБ на захист довкілля | 3,75 |
| | РАЗОМ | 90,51 |

Дані, потрібні для розрахунку економічної ефективності від модернізації мобільної ГУ наведені в табл. 5.2.

Витрати на придбання кукурудзиння:

$$\Sigma S_{Q_{\text{кукур}}} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{\text{об.газ}} \cdot \psi \cdot S_{Q_{\text{кукур}}} \cdot \eta^{-1}, \quad (5.6)$$

Витрати на продукування 1000 м³ газу (загально-технологічні), грн:

$$F = (S + A + S_{\text{ремонт}} + \Sigma S_{Q_{\text{кукур}}}) \cdot 10^3 / Q_{\text{об.газ}} \quad (5.7)$$

Річний економічний ефект:

$$E = (G_1 - G_2) \cdot Q_{\text{об.газ/рік}}, \quad (5.8)$$

Приведені витрати:

$$G = F + E_m \cdot H_{\text{кап.вкл}}, \quad (5.9)$$

Дані для розрахунку економічної ефективності від модернізації мобільної ГУ

| Показник | Розмірність | Мобільна ГУ | |
|---|---------------------|--------------|---------------|
| | | базова | модернізована |
| Паливо | | кукурудзиння | кукурудзиння |
| Витрати кукурудзиння $Q_{кукуруд.}$ | м ³ /кг | 3,8 | 3,0 |
| Об'ємне виробництво газу $Q_{об.газ}$ | м ³ /ГОД | 110 | 110 |
| Вища теплотворна здатність газу Q_B^{zz} | МДж/м ³ | 7,5 | 11,76 |
| Час обслуговування мобільної ГУ $J_{об.уст.}$ | хв/зміну | 45 | 30 |
| Вартість допоміжного обладнання | грн | - | 90,51 |

Річний економічний ефект від введення мобільної ГУ на підприємстві, грн/рік:

$$E = (F_{\bar{o}} + E_M \cdot H_{кап.вкл.\bar{o}}) \cdot \frac{G_M}{G_{\bar{o}}} \cdot \left(\frac{R_{\bar{o}} + E_{\bar{o}}}{R_M + E_M} \right) + \frac{(R_{\bar{o}}^1 - R_M^1) - E_M \cdot (H_{кап.вкл.\bar{o}}^1 - H_{кап.вкл.M}^1)}{R_M + E_M} - Q_{об.газ/рік} \cdot (F_M + E_M \cdot H_{кап.вкл.M}) \quad (5.10)$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T = (H_{кап.вкл.M} - H_{кап.вкл.\bar{o}}) / (F_M - F_{\bar{o}}) \quad (5.11)$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$K_E = 1 / T \quad (5.12)$$

Зниження собівартості виробництва газу за умови його вищої теплотворної здатності:

$$L = 100 \cdot (1 - F_M / F_{\bar{o}}) \quad (5.13)$$

За результатами економічних розрахунків складемо таблицю 5.3.

Результати економічних розрахунків віднесені на виробництво 10^3 м^3 газу

| № п/п | Показник | Значення показників | |
|----------|--|---------------------|--------------|
| | | базовий | пропонований |
| 1 | Вартість кілограма кукурудзиння, грн | 1,4 | 1,4 |
| 2 | Підвищення теплової спроможності газу, % | - | 36,2 |
| 3 | Сумарні витрати коштів на придбання кукурудзиння, грн | 380 | 300 |
| 4 | Витрати на ЗП та відрахування, грн | 1090,62 | 905,24 |
| 5 | Відрахування на амортизацію (15% вартості мобільної ГУ), грн | 714,51 | 783,15 |
| 6 | Відрахування на ТО та ПР (8%), грн | 314,55 | 337,18 |
| 7 | Інші експлуатаційні витрати 10%, грн | 410,12 | 465,12 |
| 8 | Сумарні витрати, грн | 2909,80 | 2790,54 |
| 9 | Відносне зниження собівартості, % | - | 4,27% |
| 10 | Додаткові капітальні вкладення, грн | - | 90510 |
| 11 | Річна програма виробництва 10^3 м^3 газу | 200 | 200 |
| 12 | Річний економічний ефект, грн | - | 35486,0 |
| 13 | Коефіцієнт економічної ефективності | - | 0,493 |
| 14 | Термін окупності додаткових капітальних вкладень, років | - | 2,03 |

5.2. Висновки до розділу 5

1. При використанні модернізованої ГУ собівартість виробництва газу, з врахуванням підвищення його теплотворної здатності, знизилась на 4,27%.

2. Річний економічний ефект від модернізації мобільної ГУ на кукурудзинні склав 35486 грн при програмі виробництва газу 200 тис. м^3 /рік;

3. Термін окупності додаткових капітальних вкладень у розмірі 90510 грн склав 2,03 роки, а коефіцієнт економічної ефективності – 0,493.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз паливних характеристик аграрної біомаси свідчить, що кукурудзиння є гарною альтернативою викопним видам палива, маючи при цьому наближену до викопних палив теплотворну здатність в межах 17 МДж/кг та суттєво нижчий вміст сірки та хлору, рівний 1%. Недоліком кукурудзиння є висока зольність, яка може сягати до 12%, та потреба в попередній підготовці кукурудзиння до термічного розкладання в газогенераторі.

2. Представлено удосконалений технологічний процес виробництва пелет з кукурудзиння, що дозволило підвищити насипну щільність цієї сировини зі 174 до 650 кг/м³ та покращити якісні характеристики. Це, в свою чергу, дозволило підвищити у виробленому газі вміст CO та H₂.

3. Проведений аналіз технологій виробництва генераторного газу з біомаси свідчить, що в умовах фермерських господарств краще застосувати мобільну установку модульного типу, оснащену протипотоковим газогенератором. Це дозволить, при оснащенні її додатковим обладнанням, таким як насосна станція, електрогенератор, оприскувач та ін. забезпечити виконання різних технологічних процесів в сільському господарстві.

4. Наведено методику розрахунку та обґрунтовано параметри конвектора, колосникової решітки та бункера газогенератора, що дозволило підвищити ефективність виробництва газу з кукурудзиння. При цьому теплоспроможність газу зросла на 36,2% при його об'ємному виробництві 110 м³/год.

5. Розроблено заходи з техніки безпеки та пожежної безпеки при експлуатації мобільної газогенераторної установки модульного типу, які запобігають травмуванню та ураженню працівників під час роботи.

6. При використанні модернізованої мобільної газифікаційної установки собівартість виробництва газу, з врахуванням підвищення його теплотворної здатності, знизилась на 4,27%. Річний економічний ефект від модернізації установки на кукурудзинні склав 35486 грн при програмі виробництва газу 200 тис. м³/рік. Термін окупності додаткових капітальних вкладень у розмірі 90510 грн склав 2,03 роки, а коефіцієнт економічної ефективності – 0,493.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abouemara, K., Shahbaz, M., McKay, G., & Al-Ansari, T.A. (2024). The review of power generation from integrated biomass gasification and solid oxide fuel cells: current status and future directions. *Fuel*.
2. Akhator, P., Obanor, A.I., & Sadjere, G.E. (2022). Experimental Studies on Synthesis Gas Production from Wood Wastes in a Pilot Downdraft Gasifier. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 61, 115–128.
3. Alnouss, A., McKay, G., & Al-Ansari, T.A. (2020). A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study. *Energy Conversion and Management*, 208, 112612.
4. Arnavat, M.P., Thomsen, T.P., Sárossy, Z., Gadsbøll, R.Ø., Clausen, L.R., & Ahrenfeldt, J. (2020). Biomass gasification for bioenergy.
5. Ayub, Y., Ren, J., & Shi, T. (2024). Exploring Gasification Process and Technology for Biomass-Waste Utilization: A Comprehensive Review on the Path to Sustainable Energy. *Process Safety and Environmental Protection*.
6. Basu, P. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2013; 548p, ISBN 978-0-12-396488-5.
7. Caro, S.; Torres, D.; Toledo, M. Syngas production from residual biomass of forestry and cereal plantations using hybrid filtration combustion. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 2568–2577.
8. Colantoni, A., Villarini, M., Monarca, D., Carlini, M., Mosconi, E.M., Bocci, E., Rajabi Hamedani, S. (2021). Economic Analysis and Risk Assessment of Biomass Gasification CHP Systems of Different Sizes through Monte Carlo Simulation. *Energy Rep.*, 7, 1954–1961.
9. Dejtrakulwong, C.; Patumsawad, S. Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of Moisture Content and Air to Fuel Ratio. *Energy Procedia* 2014, 52, 142–149.

10. Devi, G.S., Vaishnavi, S., Srinath, S., Dutt, B., & Rajmohan, K.S. (2020). Energy recovery from biomass using gasification.
11. Faizan, M., & Song, H. (2023). Critical review on catalytic biomass gasification: State-of-Art progress, technical challenges, and perspectives in future development. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137224>.
12. Fu, Z., Aghdam, N.C., Nekoeian, S., He, J., Cheng, L., Liu, S., Zhang, L., Chao, J., Wei, X., Wang, R., Nagda, B., Zhang, Y., Ma, Z., Ellis, N., Bi, X., Smith, K., Lim, J., Legros, R., & Duo, W. (2024). Hot syngas cleanup for pilot two-stage fluidized bed steam-oxygen biomass gasification plant. *Bioresource technology*, 131876.
13. Gao, Y., Wang, M., Raheem, A., Wang, F., Wei, J., Xu, D., Song, X., Bao, W., Huang, A., Zhang, S., & Zhang, H. (2023). Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters. *ACS Omega*, 8, 31620–31631.
14. Golub, G., Tsyvenkova, N., Golub, V., Chuba, V., Omarov, I., & Holubenko, A. (2022). Determining the effect of the structural and technological parameters of a gas blower unit on the air flow distribution in a gas generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8 (118)), 29–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263436>
15. Golub, G., Tsyvenkova, N., Kukharets, S., Holubenko, A., Omarov, I., Klymenko, O., Mudryk, K., & Hutsol, T. (2023). European Green Deal: An Experimental Study of the Biomass Filtration Combustion in a Downdraft Gasifier. *Energies*, 16(22), 7490. <https://doi.org/10.3390/en16227490>
16. Golub, V. Chuba, N. Tsyvenkova, O. Marus, Y. Yarosh Y. Yarosh. Bioenergy potential of Ukrainian agriculture. – *International Journal of Renewable Energy Research*, 2021, vol. 11, no. 3, 1223-1229. DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i3.12144.g8254>
17. Güell, B., Sandquist, J., & Sørum, L. (2017). Gasification of Biomass to Second Generation Biofuels: A Review.

18. Guerrero, J., Sala, S., Fresneda-Cruz, A., Bolea, I., Carmona-Martínez, A. A., & Jarauta-Córdoba, C. (2023). Techno-Economic Feasibility of Biomass Gasification for the Decarbonisation of Energy-Intensive Industries. *Energies*, *16*(17), 6271. <https://doi.org/10.3390/en16176271>
19. Gülsaç, I.I., Çetin, Y., Engin, B., Aksoy, P.G., Karataş, H., & Sarioglan, A. (2016). Thermochemical conversion behavior of different biomass feedstocks: pyrolysis and gasification. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, *3*, 731–746.
20. Hameed, Z.A., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A., Ghauri, M., Khurram, M.S., Rehan, M., & Nizami, A.S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *136*, 110375.
21. Jenkins, R. G. (2020). Thermal gasification of biomass – a primer. *Bioenergy*, 293–324. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815497-7.00015-4>
22. Kamaruzaman, N.S., Manaf, N.A., Milani, D., & Abbas, A. (2023). Assessing the Current State of Biomass Gasification Technology in Advancing Circular Economies: A Holistic Analysis from Techno-Economic-Policy Perspective in Malaysia and Beyond. *Chemical Engineering Research and Design*.
23. Kukharets, S., Sukmanyuk, O., Yarosh, Y., & KukharetsM. (2020). THE POTENTIAL AND WAYS OF AGRICULTURAL BIOMASS HYDROGEN PRODUCTION ASSESSMENT. *Vidnovluvana Energetika*, (4(63), 89-99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).89-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).89-99)
24. Kukharets, S., Tsyvenkova, N., Yaroslav, Y., Grabar, I., & Holubenko A. (2018). The results of study into the effect of airsteam blast on the lowgrade fuel gasification process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6*(8 (96), 86–96. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147545>
25. Li, S.; Wu, Y.; Dao, M.U.; Dragoi, E.-N.; Xia, C. Spotlighting of the role of catalysis for biomass conversion to green fuels towards a sustainable environment: Latest innovation avenues, insights, challenges, and future perspectives. *Chemosphere* 2023, *318*, 137954.

26. Maitlo, G., Ali, I., Mangi, K. H., Ali, S., Maitlo, H. A., Unar, I. N., & Pirzada, A. M. (2022). Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production: Current Status and Future Trends. *Sustainability*, *14*(5), 2596. <https://doi.org/10.3390/su14052596>
27. Maitlo, G., Mahar, R.B., Bhatti, Z.A., & Nazir, I. (2019). A Comprehensive Literature Review of Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production and Associated Challenge. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*.
28. Molino, A., Chianese, S., Musmarra, D. (2016). Biomass Gasification Technology: The State of the Art Overview. *J. Energy Chem.* *25*, 10–25.
29. Molino, A.J., Larocca, V., Chianese, S., & Musmarra, D. (2018). Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review. *Energies*, *11*, 811.
30. Monir, M., Abd Aziz, A., Kristanti, R.A., & Yousuf, A. (2018). Syngas Production from Co-gasification of Forest Residue and Charcoal in a Pilot Scale Downdraft Reactor. *Waste and Biomass Valorization*, *11*, 635–651.
31. Ogugua, P.C., Su, H., & Wang, E. (2024). Synergistic blending of biomass, sewage sludge, and coal for enhanced bioenergy production: Exploring residue combinations and optimizing thermal conversion parameters. *Journal of environmental management*, *352*, 120035.
32. Pati, S., & De, S. (2021). Model development and thermodynamic analysis of biomass co-gasification using Aspen plus. *Indian Chemical Engineer*, *63*, 172–183.
33. Patra, T. K., Nimisha, K. R., Sheth, P. N. (2016). A comprehensive dynamic model for downdraft gasifier using heat and mass transport coupled with reaction kinetics. *Energy*, *116*, 1230–1242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.036>
34. Pavlenko, M., Chuba, V., Tsyvenkova, N., Tereshchuk, M. (2020). Experimental study on biomass air-steam gasification effectiveness in downdraft gasifier. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev.2020.19.tf495>

35. Rios, M., González, A.M., Lora, E.E., & Olmo, O.A. (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass & Bioenergy*, *108*, 345–370.
36. Sansaniwal, S.K., Rosen, M.A., & Tyagi, S. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *80*, 23–43.
37. Santana, H.E., Jesus, M.S., Santos, J., Rodrigues, A.C., Pires, P., Ruzene, D.S., Silva, I.P., & Silva, D.P. (2025). Lignocellulosic Biomass Gasification: Perspectives, Challenges, and Methods for Tar Elimination. *Sustainability*.
38. Schilling, C., Mola-Yudego, B., Marinescu, M., Gaston, C., & Röser, D. (2025). Biomass Gasification as a Viable Alternative for Small-scaled Combined Heat and Power Technologies in Remote Communities in Canada. *BioEnergy Research*.
39. Sikarwar, V.S., Zhao, M., Clough, P.T., Yao, J.G., Zhong, X., Memon, M.Z., Shah, N., Anthony, E.J., & Fennell, P.S. (2016). An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, *9*, 2939–2977.
40. Singh, D.K., Raj, R.R., Tirkey, J.V., Jena, P., Parthasarathy, P., Mckay, G., & Al-Ansari, T.A. (2023). Progress and utilization of biomass gasification for decentralized energy generation: an outlook & critical review. *Environmental Technology Reviews*, *12*, 1–36.
41. Situmorang, Y.A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *117*, 109486.
42. Sliper, M.R. (2024). A Comprehensive Review of Features, Applications and Techniques in Materials Characterization. *Journal of Computational Intelligence in Materials Science*.
43. Tregub, M., Holubenko, A., Tsyvenkova, N. (2021). Experimental Studies of Structural and Technological Parameters of a Downdraft Gasifier Based on Plant Biomass. *Scientific Horizons*, *24* (6), 9–23.

44. Trninic, M., Stojiljković, D., Jovović, A., & Jankes, G. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 1–8.
45. Tsyvenkova, N., Kukharets, S., Kukharets, V., Savchenko, N. (2020). Experimental study of influence of tuyere belt design on thermal conditions of gasification chamber operation. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings.
46. Uddin, M.N., & Nithe, N.A. (2025). A Comprehensive Exploration of Biomass Gasification Technologies Advancing United Nations Sustainable Development Goals: Part II. *Johnson Matthey Technology Review*.
47. Wurzenberger, J. C., Wallner, S., Raupenstrauch, H., Khinast, J. G. (2002). Thermal conversion of biomass: Comprehensive reactor and particle modeling. *AIChE Journal*, 48 (10), 2398–2411.
48. Yu, M., Masnadi, M.S., Grace, J., Bi, X., Lim, C.J., & Li, Y. (2015). Co-gasification of biosolids with biomass: Thermogravimetric analysis and pilot scale study in a bubbling fluidized bed reactor. *Bioresource technology*, 175, 51–8.
49. Renewable energy in agriculture / G.A. Golub, O.V. Skydan, S.M. Kukharets, N.M. Tsyvenkova et al.; edited by G.A. Golub and O.V. Skydan. Kyiv-Zhytomir: NULES of Ukraine-Polissia University, 2023. 400 p.
50. Машини та обладнання для біоенергетики: навч. посіб. / Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Марус О. А., Павленко М. Ю., Яременко О. А.; за ред. Г. А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2022. 203 с.\
51. Виробництво і використання біопалив в агроєкосистемах. Механіко-технологічні основи: монографія / Голуб Г. А., Кухарець С.М., Чуба В. В., Марус О.А.; за ред. Г. А. Голуба. К.: НУБіП України, 2018. 254 с.
52. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві: навчальний посібник / за ред. Г.А. Голуба. К.: НУБіП України, 2017. 229 с.
53. Пожарова О. В. Охорона праці : навчальний посібник / О. В. Пожарова. Одеса, 2022. 86 с. <https://doi.org/10.32837/11300.18442>
54. Рогач С.М., Суліма Н.М., Гуцул Т.А. Економіка підприємства (в схемах і таблицях): Навч. посібник. К.: «ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 508 с.